

**FLUJO ANULAR AGUA-ACEITE (SAE 85W140) EN TUBERÍA  
HORIZONTAL: REDUCCIÓN DE CAÍDA DE PRESIÓN.**

**DANIEL FELIPE GONZÁLEZ GONZÁLEZ**

**OSCAR VEGA PAVA**

**UNIVERSIDAD ECCI**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTÁ, D.C. 2017**

**FLUJO ANULAR AGUA-ACEITE (SAE 85W140) EN TUBERÍA  
HORIZONTAL: REDUCCIÓN DE CAÍDA DE PRESIÓN**

**DANIEL FELIPE GONZÁLEZ GONZÁLEZ**

**OSCAR VEGA PAVA**

**Directores**

**MSc. Vladimir Silva Leal**

**MSc. Andrés Gaona Sierra**

**UNIVERSIDAD ECCI**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTÁ, D.C. 2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del presidente del jurado

Bogotá, día de mes de año

**TITULO DE PROYECTO: “FLUJO ANULAR AGUA-ACEITE (SAE  
85W140) EN TUBERÍA HORIZONTAL: REDUCCIÓN DE CAÍDA DE  
PRESIÓN”**

## **DEDICATORIA**

Ante todo, a Dios por estar siempre presente en mi vida y darme salud, sabiduría y fortaleza para seguir siempre adelante y cumplir con un sueño, a mis padres por la educación y consejos que siempre me han brindado, a mis hermanos por enseñarme a perseverar en mis sueños y hacerlos realidad, a mis sobrinos quienes me inspiran a ser cada día mejor, a los Ingenieros Andrés Gaona y Vladimir Silva quienes me orientaron para la feliz culminación de esta investigación.

OSCAR VEGA PAVA

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por permitirme terminar una etapa importante de mi vida, y haberme dado salud y fuerzas para superar todos los obstáculos que se presentaron a lo largo del Camino.

### **A mi madre Martha González**

Por darme la vida y brindarme su amor incondicional, sus consejos en los momentos difíciles y buenos de mi vida, por su apoyo y su comprensión, por todos los esfuerzos que hace cada día por mi bienestar.

### **A mi padre Orlando González**

Por ser un ejemplo de vida para mí, por sus esfuerzos de tantos años para el bienestar de mis hermanas y el mío propio. Por su amor incondicional, su apoyo en cada momento, por sus enseñanzas, su comprensión para conmigo, y por ser parte de mí existir.

### **A mi hermana Natalia González**

Por su apoyo en cada momento de mi vida, por su cariño y por tantas alegrías que hemos pasado juntos en el transcurso de estos años, que duraran para siempre.

### **A mi hermana Wendy González**

Por su apoyo incondicional en todo momento, por su cariño, y por estar conmigo en cada logro que he conseguido en mi vida. Por darme el privilegio de

ser Tío y la confianza de asumir el rol de Padrino, ya que para mí es un gran honor y privilegio.

### **A mi Sobrino Juan José**

Por ser parte importante de mi vida, por ser una inspiración en mi vida que me permite ser cada día mejor ser humano para así poder ser un buen ejemplo en tu vida. Que a pesar de haber llegado a este mundo hace muy poco tiempo, ya lograste ocupar un espacio en el corazón de todos nosotros.

### **A mi Familia**

Mis Abuelos Juan González, Pedro González, y Graciela Preciado por ser parte importante de mi vida, que a pesar que ya no se encuentren con nosotros, siempre nos seguirán apoyando y cuidando desde donde se encuentre, y siempre estarán presentes en nuestros corazones. A mi Abuela Blanca García por estar conmigo en todo momento, y a Dios por tener el privilegio de tenerla todavía presente conmigo, y por ser una gran madre para mí, y para mis hermanas. Y a toda mi familia en general por su apoyo constante.

DANIEL FELIPE GONZÁLEZ

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi pregrado.

A mis padres por inculcarme valores y principios.

A mi familia por apoyarme siempre y brindarme su sabiduría y consejos.

A la Universidad ECCI hacerme un profesional.

A los docentes por sus enseñanzas, dedicación y tiempo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme cumplir este gran objetivo de mi vida.

A mi familia por su apoyo en todo este proceso.

A mis profesores que me enseñaron gran parte del conocimiento que adquirieron de su experiencia.

A mis directores de proyecto los profesores Andrés Gaona sierra y Vladimir Silva Leal por sus constantes orientación acerca del tema.

A la Universidad ECCI por brindarnos los espacios y recursos para la realización de este proyecto de grado.

## RAE

<b>RAE CÓDIGO:</b>
<b>AUTORES:</b> González Gonzales, Daniel; Vega Pava, Oscar.
<b>TÍTULO DEL DOCUMENTO:</b> Flujo anular agua-aceite en tubería horizontal: reducción de caída de presión.
<b>DATOS DE EDICIÓN:</b> Sin editar, Bogotá, dic de 2016, diciembre 9 páginas.
<b>UNIDAD PATROCINANTE:</b> Universidad ECCI.
<b>PALABRAS CLAVE:</b> fluidos, presión,
<b>DESCRIPCIÓN:</b> Proyecto de investigación, para obtener el título de Ingeniero Mecánico.
<b>CONTENIDO:</b> Debido a las pérdidas excesivas de caídas de presión en tuberías que transportan crudos pesados, se han generado una serie de estudios tendientes a hacer más eficiente dicho proceso. Dichas caídas de presión son causadas por la alta viscosidad que poseen estos materiales ( $^{\circ}\text{API}<119$ ) lo que hace inviable económicamente ni técnicamente su transporte sin ningún proceso adicional. Para que esto sea posible, se ha implementado nuevos métodos de transporte, por ejemplo: formación de emulsiones, calentamiento de tuberías, tratamiento térmico del crudo y una de las más resientes el método “core-anular” o núcleo anular.
<b>METODOLOGÍA:</b> El diseño metodológico consta de técnicas cuantitativas y cualitativas que incluyen métodos experimentales, de investigación, de observación y análisis.
<b>FUENTES:</b>

## RESUMEN

Una de las mayores dificultades que presenta la industria petrolera, es la movilización del crudo pesado hacia las refinerías y puertos, debido a que los métodos de transporte utilizados en la actualidad presentan distintos inconvenientes, siendo el principal el aumento de presión a lo largo de las tuberías.

Esto se debe principalmente a las diferencias de presión que se dan a lo largo de su recorrido, las cuales aumentan debido a la viscosidad del crudo, representando costos económicos y logísticos adicionales a las compañías petroleras. El régimen de flujo anular de dos líquidos inmiscibles donde un líquido de baja viscosidad rodea uno muy viscoso, puede ser un método de transporte llamativo para el crudo pesado. Con este método se puede reducir la caída de presión a lo largo de la tubería, debido a la disminución de las pérdidas por fricción, que se da entre el fluido y las paredes de la tubería, reduciendo costos de mantenimiento y energía en el sistema de bombeo para el transporte de crudo pesado.

El objetivo de la investigación es estudiar la caída de presión en una tubería horizontal transportando fluidos viscosos mediante el método de transporte por flujo anular, para esto se hace de gran importancia el diseño de la geometría de una boquilla, que permitiera la formación del patrón de flujo característico (flujo anular), a su vez será ensamblada en un montaje experimental conformado por componentes y equipos. Con el fin de realizar pruebas correspondientes y obtener un muestreo de datos e imágenes.

El tipo de investigación abordado en el trabajo general es de tipo experimental, donde se analiza el efecto, en primer orden, producido por las condiciones iniciales de la industria petrolera, específicamente en el diseño de métodos de transporte, es ahí donde el trabajo interno de la investigación se enfoca a desarrollar variables independientes con

miras a influir sobre variables dependientes. Estos resultados de caída de presión experimentalmente obtenidos con el régimen de flujo anular, se compararán con la caída de presión que se tiene en la tubería al fluir solo aceite, con el fin de determinar el porcentaje de reducción de esta caída de presión con este método.

**PALABRAS CLAVES:** Caída de presión, Flujo Anular, Crudo pesado, Flujo Turbulento, Numero de Reynolds, Viscosidad.

## ABSTRACT

One of the major difficulties of the oil industry is the mobilization of heavy oil to refineries and ports, because the transport methods used today have different drawbacks, the main one being the reduction of pressure drop to the Length of the pipes. This is mainly due to the pressure losses that occur along its route, increasing considerably due to the high viscosity of the crude, representing additional economic and logistic costs to the oil companies.

The annular flow rate of two immiscible liquids where a low viscosity liquid surrounds a highly viscous liquid may be a transportation method for heavy crude. With this method, the pressure drop along the pipe can be reduced due to the decrease in friction losses (since the less viscous ring allows more flow), which occurs between the fluid and the pipe walls, Reducing maintenance and energy costs in the pumping system for heavy crude transportation.

The objective of the research is to study the pressure drop in a horizontal pipe transporting viscous fluids by the transport method by the annular flow, for this the design of the geometry of a nozzle is made of great importance, which allows the formation of the characteristic flow pattern (annular flow), one assembled in an experimental setup. In order to perform tests and obtain a sampling of data and images.

Type of research addressed in the general work is of an experimental type, where the effect, in the first order, produced by the initial conditions of the petroleum industry, specifically in the design of transport methods, is where the internal work of the research focuses on developing independent variables with a view to influencing dependent variables. These experimental pressure drop results were obtained with the annular flow rate, they are compared to the pressure drop in the pipe with the single oil, in order to determine the percentage of reduction of pressure drop with this method.

**KEYWORDS:** Pressure drop, Annular Flow, Laminar Flow, Turbulent Flow, Reynolds number, Viscosity.

## TABLA DE CONTENIDO

---

1.	INTRODUCCIÓN .....	18
2.	DISEÑO DE BOQUILLAS .....	30
2.1.	DISEÑO BOQUILLA 1 .....	32
2.2.	DISEÑO BOQUILLA 2 .....	33
2.3.	DISEÑO BOQUILLA 3. ....	35
3.	BANCADA EXPERIMENTAL .....	38
3.1.	FUNCIONAMIENTO BANCADA EXPERIMENTAL .....	39
3.2.	SELECCIÓN DE FLUIDO VISCOZO .....	41
3.3.	SELECCIÓN DE BOMBAS .....	42
3.3.1.	BOMBA DE ACEITE.....	42
3.3.2.	BOMBA DE AGUA .....	43
4.	RESULTADOS .....	44
4.1.	VALIDACIÓN DE LA BANCADA EXPERIMENTAL.....	44
4.1.1.	CÁLCULOS CAÍDA DE PRESIÓN PARA TRANSPORTE DE SOLO ACEITE.....	45
4.2.	OBSERVACIONES PATRÓN DE FLUJO CAF .....	47
4.3.	RESULTADOS CAÍDA DE PRESIÓN CAF .....	52
4.4.	COMPARACIONES.....	54
4.4.1.	CAÍDA DE PRESIÓN TEÓRICA CAF Y TEÓRICA ACEITE .....	54
4.4.1.1.	CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN PARA EL PATRÓN DE FLUJO CAF...56	
4.4.2.	CAÍDA DE PRESIÓN EXPERIMENTALES CAF Y EXPERIMENTALES ACEITE .59	
4.4.3.	CAÍDA DE PRESIÓN CAF EXPERIMENTAL VS AGUA EXPERIMENTAL .....	61
4.4.3.1.	CÁLCULO CAÍDO DE PRESIÓN PARA TRANSPORTE DE SOLO AGUA .....	63
4.4.3.	CAÍDA DE PRESIÓN CAF TEÓRICO Y CAF EXPERIMENTAL.....	64
4.4.4.	RESULTADOS (DISTANCIA CAF DIFERENTES BOQUILLAS). ....	66
4.4.5.	COMPARACIÓN DE NUESTROS RESULTADOS CON OTROS AUTORES .....	72
4.4.5.1.	COMPARACIÓN CON EL MODELO DE P. POESIO ET. AL.....	72
4.4.5.2.	COMPARACIÓN CON EL MODELO DE G. SOTGIA. ET. AL. ....	73
5.	CONCLUSIONES .....	76
6.	RECOMENDACIONES .....	78
7.	REFERENCIAS.....	80
8.	ANEXOS.....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación Petróleo. Datos tomados de Israel et. al. [4].	18
Tabla 3: <i>propiedades del SAE 85 W 140 Gulf Gear Mp</i>	41
Tabla 4. Datos estadísticos primeras condiciones de flujo	67
Tabla 5. Datos estadísticos segunda condiciones de flujo	68
Tabla 6. Datos estadísticos tercera condición de flujo	69

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de Calibración Bomba de Aceite	42
Gráfica 2. Validación Bancada Experimental	44
Gráfica 3. Caída de presión promedio Experimental CAF	52
Gráfica 4. Caída de presión teórica CAF	54
Gráfica 5. Caída de presión teórica CAF vs Solo Aceite	55
Gráfica 6. Caída de presión promedio Experimental Solo Aceite	59
Gráfica 7. Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_w = \text{cste} = 0,25032 \text{ m/s}$ ) vs Solo Aceite	60
Gráfica 8. Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_o = 0,0609 \text{ m/s}$ ; $V_w = 0,25032 \text{ m/s}$ ) vs Solo Agua ( $V_w = 0,25032 \text{ m/s}$ )	61
Gráfica 9. Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_o = 0,04114 \text{ m/s}$ ; $V_w = 0,25032 \text{ m/s}$ ) vs Solo Agua ( $V_w = 0,25032 \text{ m/s}$ )	62
Gráfica 10. Caída de presión Experimental CAF ( $V_w = \text{Cste} = 0,25032 \text{ m/s}$ ) vs Teórico CAF	66
Gráfica 11. Distancia CAF a primeras condiciones de flujo	67
Gráfica 12. Distancia CAF a segundas condiciones de flujo	68
Gráfica 13. Distancia CAF a tercera condición de flujo	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reservas de petróleo en el mundo. Datos tomados de Irene M.[7] .....	19
Figura 2. Evolución del Crudo. Tomado de Alfonso Molina [8]. .....	19
Figura 3. Flujo núcleo anular, aceite-agua. Adaptado de Sotgia. [12].....	21
Figura 4. Esquema de los patrones de flujo agua-aceite en tuberías horizontales. Tomado y editado de Trallero [14]......	22
Figura 5. Patrones de flujos bifásicos. Tomado y editado de Domitilo. [17].....	23
Figura 6. Patrones de flujo en tuberías horizontales. Tomado y editado de Alberto et. al [16] .....	23
Figura 7. Boquillas o mezcladores agua aceite (medidas en mm). Adaptado de Sotgia. [12] .....	24
Figura 8. Patrones de flujo según variación de velocidad. Tomado y editado de Sotgia [12].	25
Figura 9. Secuencia de restauración del CAF. Tomado de Strazza [21].....	26
Figura 10. Configuraciones de flujo. Tomado de Joseph [23]. .....	27
Figura 11. Relación de radios. Tomado de Michael [22].....	27
Figura 12. Ensamble Boquilla .....	30
Figura 13. Diseño de boquillas en la literatura. Tomado de Ghosh [9] .....	31
Figura 14. Boquilla diseñada por Bensakhria. Tomado de Peysson [28] .....	32
Figura 15. Diseño de boquilla 1 medidas en (mm) .....	32
Figura 16. Diseño de boquilla 2.....	33
Figura 17. Diseño boquilla 2 parte hembra, (medidas en mm) .....	34
Figura 18. Diseño boquilla 2 parte macho, (medidas en mm).....	34
Figura 19. Boquilla 3.....	35
Figura 20. Diseño boquilla 3 parte hembra, (medidas en mm) .....	36
Figura 21. Diseño boquilla 3 parte macho, (medidas en mm).....	37
Figura 22. Bancada Experimental final.....	39
Figura 23. Bancada Experimental final partes.....	41
Figura 26. Patrones de flujo desarrollados en las prácticas experimentales .....	51
Figura 24. Análisis del CAF, Tomado Arney et. al. [34]. .....	57
Figura 27. Patrón de flujo boquilla 1 .....	71
Figura 28. Resultados de. P. Poesio Et. Al[27] .....	73
Figura 29. Resultados obtenidos por Sotgia 2008 [12]. .....	74
Figura 30. Resultados CAF de nuestras pruebas experimentales .....	75
Figura 31. Propuesta para un nuevo diseño de boquilla.....	78

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector petrolero ha adquirido en los últimos años gran importancia global, convirtiéndose en un elemento fundamental para el desarrollo de nuestra sociedad. Por mucho tiempo se creyó que el petróleo, al ser una fuente de energía no renovable, poseía el riesgo de agotarse en pocos años, poniendo en peligro parte de la sostenibilidad económica del mundo, pero la actualidad es distinta. Según lo descrito por la revista Fobres de México [1] las reservas de petróleo son muy abundantes en distintos países, en especial Venezuela y Arabia Saudita, con 297 mil y 267 mil millones de barriles, lo cual indica que se puede extraer este recurso por un largo tiempo.

No todo el crudo del mundo es homogéneo. Los crudos se diferencian según su densidad y viscosidad, también se definen en función de la gravedad API (American Petroleum Institute)[2] cuanto mayor es la gravedad API, más liviano será el crudo. En la (Tabla 1) se observan las diferentes denominaciones del crudo según el valor de la gravedad específica y su grado API, la cual se calcula mediante la ecuación 1.

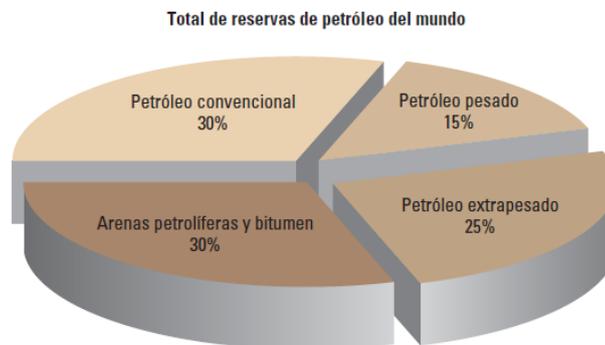
$$API = \frac{141,5}{Gravedad\ esp} - 131,5 \text{ ( a } 60^{\circ}F) \quad (\text{ecuación 1.}) \cdot [3]$$

<b>Tipo de crudo</b>	<b>°API</b>	<b>Gravedad específica</b>
Súper Ligero	>39	< 0,83
Ligero	31,1 – 39	0,87 – 0,83
Mediano	22,3 – 31,1	0,92 – 0,87
Pesado	10 – 22,3	1 – 0,92
Extra pesado	< 10	>1

**Tabla 1. Clasificación Petróleo. Datos tomados de Israel et. al. [4].**

La mayor parte de los recursos del petróleo del mundo corresponden a hidrocarburos pesados, y en la actualidad estos hidrocarburos representan más de la mitad de producción de crudo en nuestro país, convirtiéndose en el recurso más importante para el desarrollo económico de Colombia [5]. En la figura 1 se evidencia el total de los

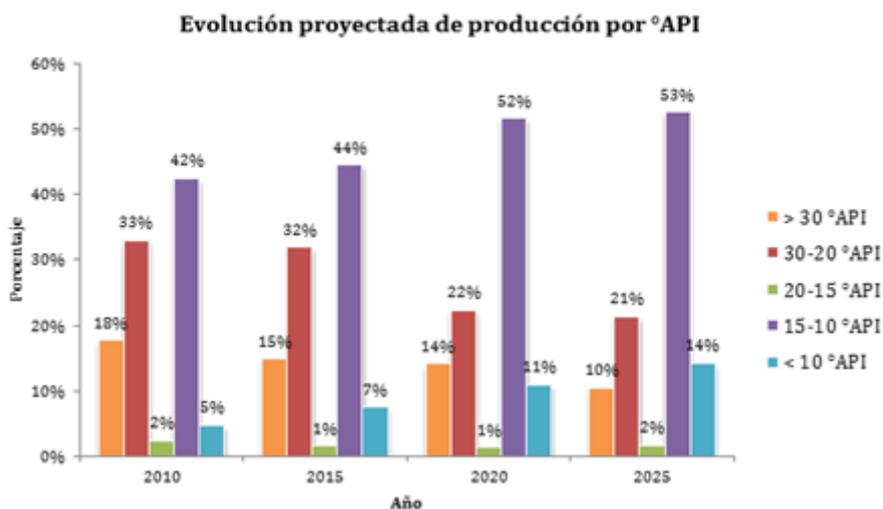
recursos de petróleo del mundo, aproximadamente 9 a 13 billones de barriles. El crudo convencional representa tan solo un 30% en aproximación del total, el restante



corresponde a crudo pesado, extra pesado y bitumen (Figura 1) [6].

**Figura 1. Reservas de petróleo en el mundo. Datos tomados de Irene M.[7]**

En la Figura 1, se puede observar que el petróleo pesado y extra pesado conforman aproximadamente el 40% de los recursos de petróleo totales del mundo. Adicionalmente, en la Figura 2 se observa la disminución en las reservas de crudo ligero a nivel mundial, mientras que los hidrocarburos con gravedad menor a 15°API han aumentado su producción en los últimos años [4].



**Figura 2. Evolución del Crudo. Tomado de Alfonso Molina [8].**

Viscosidad es la propiedad de un fluido que ofrece la resistencia al movimiento, la pérdida de energía debida a la fricción en un fluido que fluye se debe a esta propiedad [9]. la viscosidad de los petróleos ligeros y súper ligeros puede oscilar entre 1 centipoise (cP) [0,001 Pa.s] y aproximadamente 10 cP, mientras que la viscosidad de los crudos pesados y extra pesados están en un rango de 20 cP [0,02 Pa.s] y más de 1000000 cP [1000 Pa.s] [6]. La mayor parte del crudo colombiano que actualmente se comercializa tiene viscosidades alrededor de 400 cP [10].

Los nuevos hallazgos de crudo pesado, el rápido crecimiento de la producción de crudo, y la importancia de éste como recurso energético para el mundo en general, hace que se centre la atención en la optimización de los distintos procesos que son necesarios para la obtención del petróleo y sus derivados. Se ha logrado evidenciar que se presentan inconvenientes en la infraestructura para su transporte (oleoductos) ya que es insuficiente para atender el exceso de demanda de parte de las empresas que explotan crudo pesado[11].

El transporte de este crudo hacia las refinerías y puertos se ha convertido en una de las mayores dificultades en la industria, siendo la principal, las altas caídas de presión a lo largo de las tuberías.

Así mismo el crudo cuando es transportado desde el yacimiento hasta los cabezales de producción, y posteriormente a las estaciones de flujo y descarga, va acompañado de otros fluidos como agua, gas natural y sedimentos sólidos, formando distintas configuraciones geométricas, y presentando múltiples fases en la tubería, definidas como patrones de flujo [12].

Para el transporte de crudo pesado por oleoductos existen actualmente dos enfoques generales: (1) reducción de la viscosidad del aceite y (2) reducción a la fricción entre el aceite y el interior de la tubería.

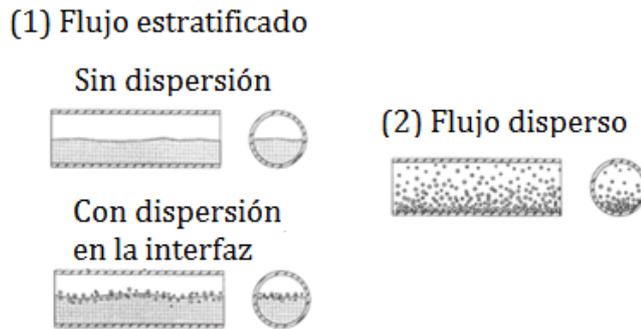
Una técnica de transporte de crudo pesado sugerente es el Flujo Núcleo-Ánulo, (CAF, llamado así por sus siglas en inglés *Core-Annular Flow*), que consiste en el transporte simultáneo por medio de una tubería, de un fluido muy viscoso y un fluido de baja viscosidad. En esta técnica el aceite fluye en el centro de la tubería (núcleo) y el agua fluye como un anillo alrededor de ella (Figura 3). Este tipo de técnica de transporte presenta algunas desventajas a la hora de su implementación: adaptación de los oleoductos para lograr el CAF, estabilidad del régimen durante largas distancias, alto riesgo de estratificación de la mezcla [13], aumento en la energía de transporte debido al incremento del caudal por la adición de agua, entre otras.



**Figura 3. Flujo núcleo anular, aceite-agua. Adaptado de Sotgia. [14]**

Varios autores han dedicado tiempo al estudio del régimen CAF, detallando los tipos de patrones de flujo, diseños de boquillas, diferencia de presión experimental, estabilidad CAF, relación de radioso o revestimiento de las tuberías.

Los autores Trallero et. al. [15] clasificaron algunos de los patrones de flujo observados, con la finalidad de estandarizar una nomenclatura. Para ello identificaron con ayuda de sondas de conductancia, seis patrones de flujo y los clasificaron en dos categorías: flujo segregado y flujo disperso, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4. Esquema de los patrones de flujo agua-aceite en tuberías horizontales. Adaptado de Trallero [16].**

De la Figura 4 se observa la clasificación de los patrones de flujo donde: (1) flujo estratificado: en éste, las dos fases están separadas por la gravedad, donde la fase más densa fluye en el fondo de la tubería, se distinguen dos subpatrones: flujo estratificado sin dispersión y flujo estratificado con mezcla en la interfaz; (2) flujo disperso: en éste se pueden identificar dos fases: una fase continua y una fase dispersa formada por gotas de una misma sustancia de distinto tamaño, mientras más pequeñas mayor es la dispersión [17]. Un tamaño grande de gota indicaría una nueva continuidad, dependiendo la fase que se presente en mayor proporción, se pueden distinguir: patrones de flujo dominados por agua, patrones dominados por aceite, y emulsiones de agua en aceite.

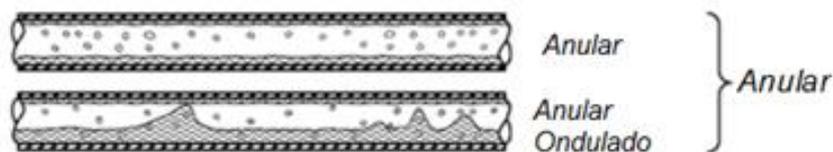
Taitel y Dukler en su tesis de grado [18], establecieron un modelo para la determinación del patrón de flujo tomando como punto de partida que la configuración existente es el flujo estratificado en equilibrio. Básicamente, el análisis considera la transición entre cinco patrones de flujo: estratificado liso (SS), estratificado ondulado (SW), intermitente (I), anular con líquido disperso (AD) y burbuja dispersa (DB) los cuales se observan en la Figura 5.



**Figura 5. Patrones de flujos bifásicos. Adaptado de Domitilo. [19]**

Estratificación: este tipo de flujo ocurre a bajas velocidades de las dos fases (aceite y agua), el agua se posiciona en la parte inferior de la tubería y el aceite flota en la parte superior de la tubería debido a una diferencia de densidades. En este tipo de régimen de flujo la fuerza gravitatoria es predominante, debido a que la gravedad trata de estabilizar la estratificación[20].

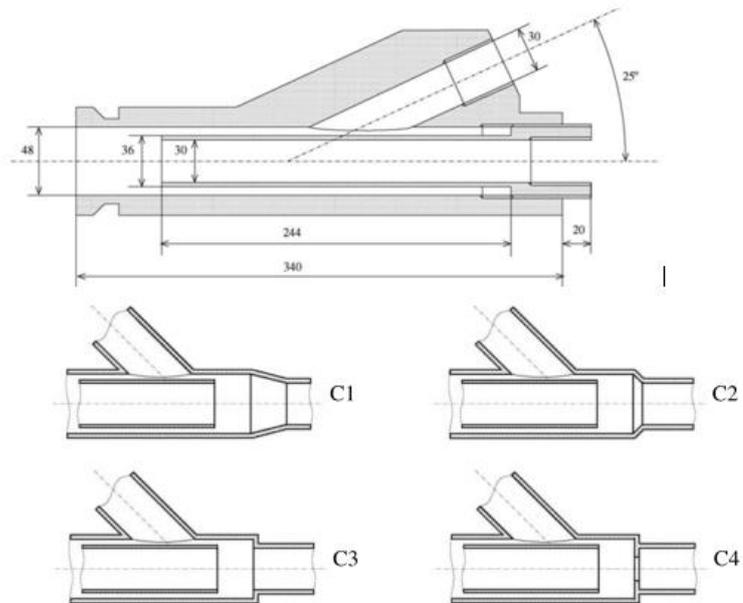
Ya explicados los patrones de flujo, se hace importante conocer en qué régimen de flujo se presenta cada patrón como se observa en la investigación de Rodriguez et. al. [21], quienes establecieron que CAF no proporciona una buena representación de datos experimentales cuando el flujo del anillo estaba en régimen turbulento ( $Re > 4000$ ) y la interfaz presentaba un flujo ondulado.



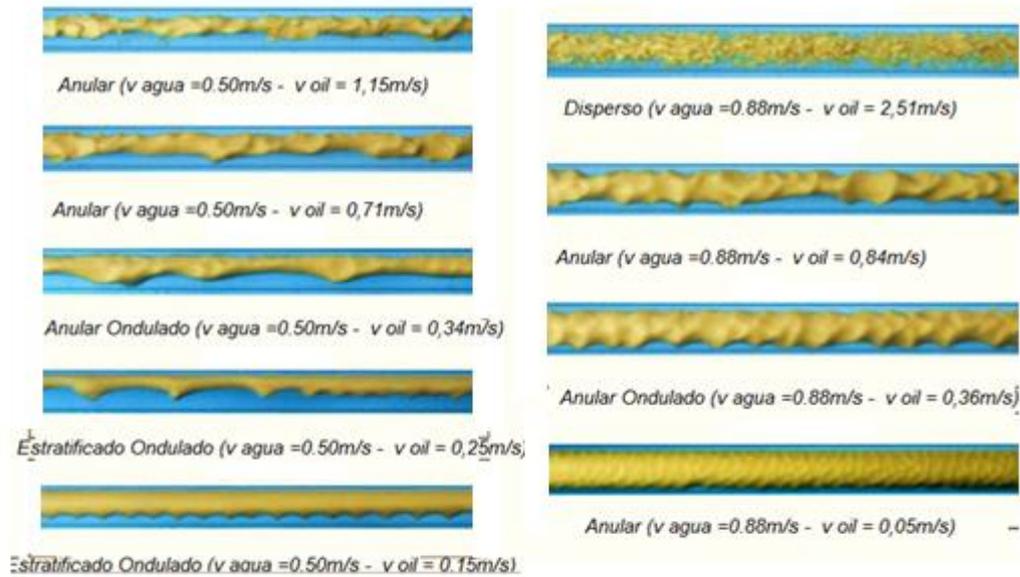
**Figura 6. Patrones de flujo en tuberías horizontales. Adaptado de Alberto et. al [18]**

En cuanto al diseño de las boquillas, Sotgia et. al. [22] realizaron un estudio experimental del comportamiento del régimen CAF, en siete tuberías de plexiglás y Pyrex, con diámetros en el intervalo entre 21 a 40 mm. Analizaron la forma de la boquilla para la

obtención del régimen (Figura 7), y las características del flujo. Estudiaron el comportamiento de la caída de presión que se presenta a lo largo de la tubería, en función de la forma que se presentó en la interfaz agua-aceite, debido a la modificación de las velocidades de flujo las cuales se observan resaltadas (Figura 8). Los autores afirman que es de gran importancia estudiar el comportamiento en la interfaz de los dos líquidos inmiscibles, y es conveniente operar el régimen CAF lejos del límite de la transición con el flujo estratificado, debido a que la aparición no deseada de la transición a la configuración estratificada daría lugar a un aumento en la caída de presión.

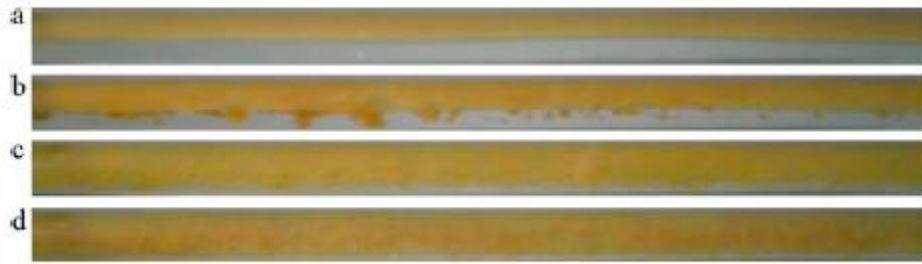


**Figura 7. Boquillas o mezcladores agua aceite (medidas en mm). Adaptado de Sotgia. [14]**



**Figura 8. Patrones de flujo según variación de velocidad. Adaptado de Sotgia [14].**

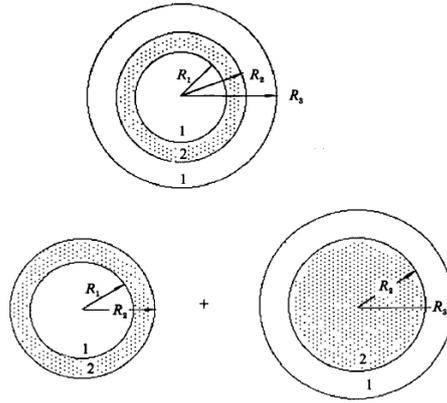
Strazza y Poesio [23], realizaron un trabajo experimental para el estudio de la caída de presión durante la restauración del CAF, después de producirse una estratificación del flujo, debido a paradas imprevistas, aseguran que la caída de presión asociada a la estratificación es mucho más grande, en comparación con el CAF, ocasionando que el flujo se detenga. Estudiaron una forma de restauración del CAF, después de producirse este problema. Una de los métodos es proporcionando un gradiente de presión más alto para tratar de establecer el flujo de agua y aceite, y la otra forma es limpiar la tubería usando solamente agua. En ambos casos puede adherirse capas delgadas de aceite en las paredes de la tubería, produciendo una caída de presión mayor, en comparación con el CAF formado antes de la estratificación. Analizaron el método de limpieza de la tubería usando solamente agua, para restablecer el CAF, una vez ha ocurrido la estratificación (Figura 9). Se observa la secuencia durante la puesta en marcha de los fluidos, para reestablecer el flujo anular.



**Figura 9. Secuencia de restauración del CAF. Tomado de Strazza [23]**

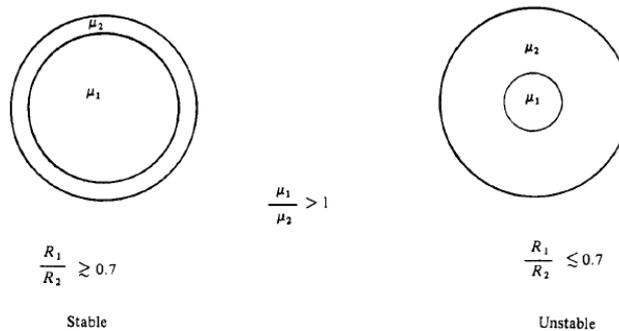
En la Figura 9, se diferencian las diferentes fases: (a) el agua empieza a fluir mientras el aceite se encuentra quieto formando nuevamente el anillo, (b) como consecuencia de la tensión de cizallamiento las gotas de aceite empiezan a separarse, (c) y se extiende sobre toda la tubería, formando una capa fina de aceite, y (d) la caída de presión vuelve al valor cercano al original [10]. También se muestran las evidencias de los resultados experimentales de la restauración de CAF, realizada por los autores.

Joseph et. al. [24] estudiaron la estabilidad lineal de tres disposiciones simétricas de dos líquidos en tuberías, utilizando un fluido viscoso como el aceite y un fluido menos viscoso como el agua. Las tres disposiciones de los fluidos estudiadas por los autores fueron: (1) el aceite fluye por el centro de la tubería formando una especie de núcleo, y el agua en la pared, (2) el agua fluye en el núcleo y el aceite por fuera, y (3) utilizaron tres capas en configuración geométrica, el aceite por dentro y fuera, con agua en el medio, utilizando paredes de la tubería hidrófobas. Los autores han realizado su investigación mediante la introducción de códigos de elementos finitos. El análisis les permitió identificar tres tipos diferentes de inestabilidad a través de sus investigaciones: Inestabilidad de tensión interfacial o inestabilidad capilar, una inestabilidad de fricción interfacial debida a la diferencia de viscosidad y una inestabilidad de tensión de Reynolds. Los autores concluyeron que la inestabilidad de tensión de Reynolds está siempre asociada con la capa del fluido menos viscoso.



**Figura 10. Configuraciones de flujo. Tomado de Joseph [25].**

Joseph et al [24] analizaron el flujo de dos líquidos inmiscibles de diferentes viscosidades y densidades similares a través de una tubería. Los resultados experimentales demostraron que hay estabilidad si el fluido más viscoso la mayor parte de la tubería y se sitúa en el núcleo, pero esa estabilidad depende de la relación de radios  $R_1 / R_2$ . Los autores encontraron que para una relación de viscosidades  $\mu_1/\mu_2 > 1$ , hay estabilidad. A su vez determinaron mediante lo experimental que una relación de radios  $R_1 / R_2 \geq 0,7$  es estable, mientras que una relación de radios menor 0,7 es siempre inestable.



**Figura 11. Relación de radios. Tomado de Michael [24]**

El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar, flujo transicional o de un flujo turbulento, además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición de este estado dentro de una longitud determinada [26]. Si “el

número de Reynolds es menor que 2000, será un flujo laminar y para un Reynolds mayor a 4000, el flujo será turbulento. Y el rango entre 2000 y 4000 se denomina región transicional, debido a que es imposible predecir que flujo existe” [9]

El número de Reynolds es adimensional y se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento). Se calcula mediante la (ecuación 2.)

$$R_E = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (\text{Ec. 2}) [9].$$

Siendo ( $v$ ) la velocidad del fluido, ( $D$ ) el diámetro interno de la tubería de pruebas, ( $\rho$ ) densidad del fluido, y ( $\mu$ ) la viscosidad dinámica del fluido de trabajo.

Sumana Ghosh et. al. [27] establecieron distintas estrategias para evitar que el aceite (fluido viscoso) ensucie la pared interna de la tubería cuando se desarrolle el CAF y de igual manera estrategias para el reinicio del flujo en la tubería. En sus experimentos demuestran que las tuberías revestidas con cemento hidratado son altamente oleofóbicas y por ende resisten las incrustaciones a largo plazo. Utilizaron una tubería con un diámetro de 0,012m y una longitud de 0,48m. Compararon la caída de Presión de dos tuberías: una de acero al carbono y la otra revestida de cemento. Después de un tiempo de parada del flujo en la tubería, los autores procedieron a reestablecer el flujo, inyectando agua gradualmente, los autores evidenciaron que después de inyectar agua para limpiar la tubería y transportar el aceite, las caídas de presión fueron aproximadamente 1100 kPa para la tubería de acero y 0,48 kPa aproximadamente para la tubería revestida de cemento. La tubería revestida de cemento después de 10 minutos de experimento, estaba completamente limpia, incluso en las secciones cercanas a la boquilla de inyección. Los

autores demostraron en sus investigaciones, que las tuberías revestidas de cemento pueden resistir las incrustaciones de aceite y a su vez facilitar el reinicio del CAF en la tubería.

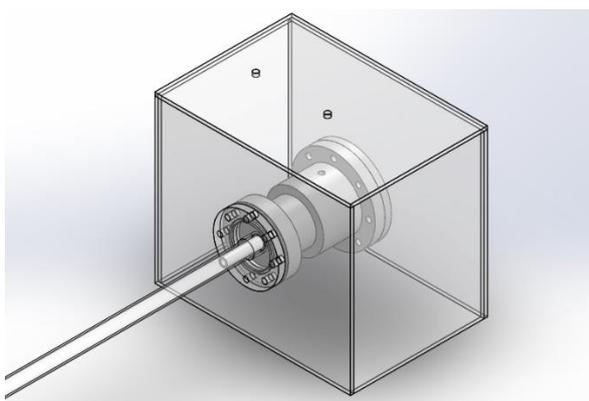
Una vez analizados los diseños de boquillas para los regímenes tratados por Sotgia [14], este proyecto presenta el estudio de los patrones de CAF formados por tres nuevos diseños de boquillas. Se estudia las caídas de presión presentadas.

Para lograr el objetivo principal es necesario: analizar las geometrías de las boquillas para la formación de flujo anular, estudiar los resultados obtenidos en el banco experimental donde se instalaron las boquillas, mediante ensayos experimentales realizados en el laboratorio de mecánica de fluidos, construir y contrastar modelos contra los presentados por Tartarini en 2008.

Con el fin de estudiar el CAF, las caídas de presión a lo largo de la tubería, las geometrías de formadas por los fluidos. En el presente trabajo de investigación se diseñaron tres boquillas las cuales están descritas tanto su forma geométrica como su funcionamiento (capítulo 2), y se construyó una bancada donde se instalaron las distintas boquillas y componentes para lograr el desarrollo del CAF se dispuso de una serie de elementos para observar y extraer datos, descritos (capitulo 3). Finalmente, en el (capítulo 4) se presentan los resultados de caídas de presión, longitud y estabilidad el CAF, patrones de flujo formados mediante resultados de las diferentes boquillas.

## 2. DISEÑO DE BOQUILLAS.

La boquilla es fundamental para el desarrollo del CAF, debido a que por medio de ella se logra la configuración geométrica característica del flujo, permitiendo la entrada del aceite (fluido viscoso) y el agua (fluido de baja viscosidad), para la formación del régimen en su interior, y el cual se deberá mantener a lo largo de su trayectoria. Esta va ensamblada a la bancada experimental (Figura 12) con la finalidad de otorgar la configuración geométrica del flujo anular, antes de la tubería.

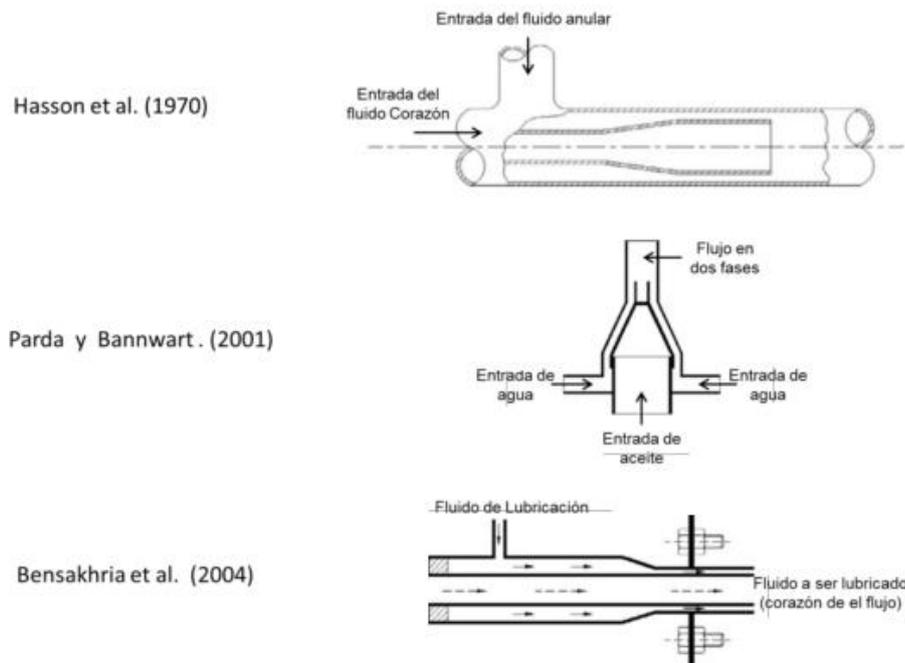


**Figura 12. Ensamble Boquilla**

Varios autores estudiaron el diseño de la boquilla, con el fin de obtener una configuración CAF, y un pleno desarrollo en la tubería.

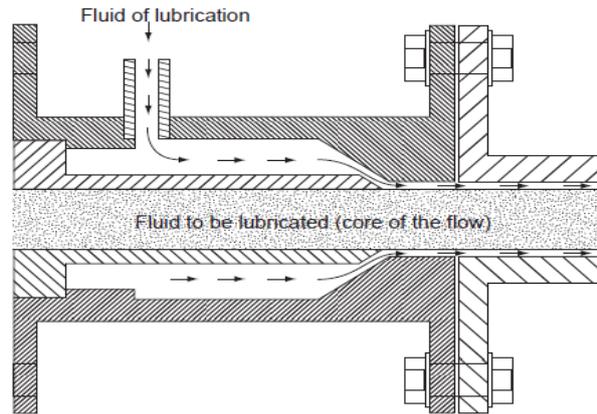
Ghosh et. al. [28] realizaron un escrito donde expusieron una revisión de los últimos estudios y avances sobre el transporte de crudo pesado por la técnica CAF de agua-aceite. Presentan una revisión de boquillas diseñadas en la literatura del tema, con el objetivo de tener en cuenta algunas características importantes para su diseño. Encontraron que Hasson et al.[11], diseñaron una boquilla de manera que el flujo bifásico se redujera gradualmente a lo largo de su trayectoria (Figura 13). Hasson et al. encontraron que este tipo de configuración reducía las perturbaciones a la entrada por cambios de secciones, estudiaron el diseño de Parida y Bannwart [27], que utilizaron una boquilla de inyector cónico, para el transporte de crudo pesado en pozos verticales. El diámetro de la entrada

de la boquilla por donde ingresaba el aceite, se reducía gradualmente hasta coincidir con el diámetro que ocuparía el aceite en la tubería de pruebas. El agua era inyectada lateralmente con el fin de rodear el aceite y formar el anillo.



**Figura 13. Diseño de boquillas en la literatura. Tomado de Ghosh [11]**

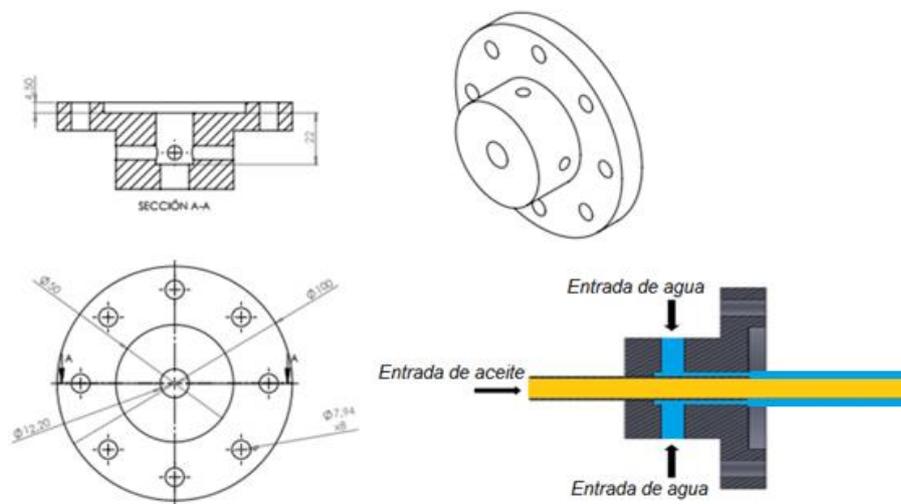
Bensakhria et al. [29] diseñaron una boquilla, en la cual el aceite fluía en el centro por medio de un ducto (Figura 14), mientras se inyectaba agua por la parte superior de la boquilla rodeando el crudo. La sección por donde fluía el líquido de baja viscosidad (agua), se iba reduciendo gradualmente hasta formar el tamaño ideal del anillo de lubricación. En su estudio experimental obtuvieron una reducción de la caída de presión de un 90%, en comparación al flujo de solo aceite. La boquilla diseñada permitió la formación del CAF, y una lubricación constante necesaria para el desarrollo del patrón de flujo de estudio.



**Figura 14. Boquilla diseñada por Bensakhria. Tomado de Peysson [29]**

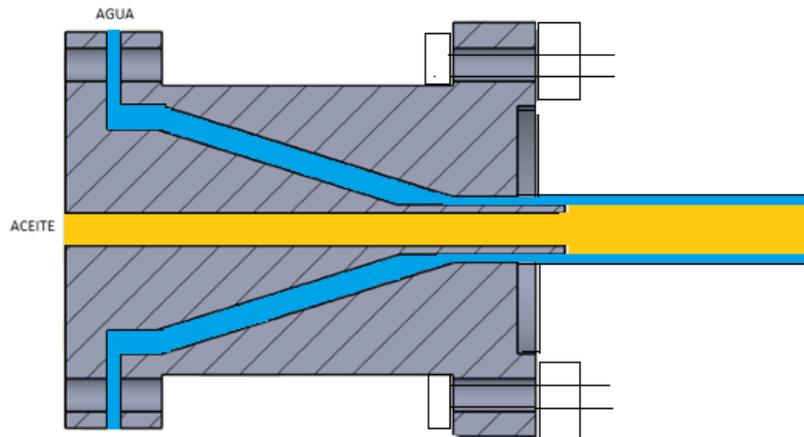
## 2.1 DISEÑO BOQUILLA 1

En la Figura 15 se observa el diseño de la primera boquilla analizada en esta investigación, la cual cuenta con cuatro perforaciones en el cilindro de menor diámetro, por los cuales ingresa el agua presurizada que se encuentra almacenada en la caja acrílica, garantizando el flujo constante de agua por la tubería de pruebas, rodeando el aceite que fluye por el centro de la tubería. En el centro de la boquilla se instaló un racor conectado a manguera por donde fluye el aceite, el cual permite formar el núcleo característico del patrón de flujo.



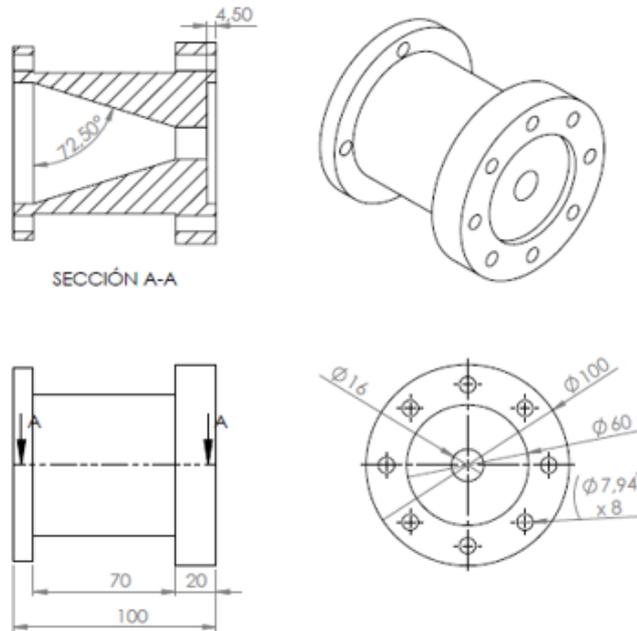
**Figura 15. Diseño de boquilla 1 medidas en (mm)**

## 2.2 DISEÑO BOQUILLA 2

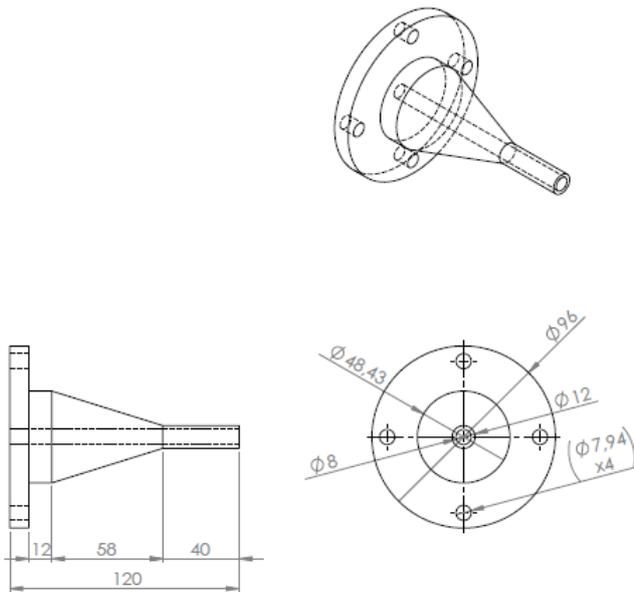


**Figura 16. Diseño de boquilla 2**

Como se mencionó anteriormente, es de gran importancia un diseño adecuado de la boquilla para un buen desarrollo del patrón de flujo CAF a lo largo de una tubería. En este diseño se apostó por una boquilla que está compuesta en dos partes, una parte hembra y otra parte macho, la entrada de agua es constante y la cantidad está determinada por la brecha o juego existente entre las dos partes de la boquilla (Figura 16). Esta brecha se logra agregando la cantidad de espaciadores de 1 mm que sean necesarios, dependiendo del caudal de agua a ingresar. Esta boquilla está dentro de una caja acrílica, que contiene agua presurizada, la alimentación de agua es constante. El aceite ingresa a la boquilla por medio de un racor conectado al centro de la parte macho de la boquilla, En las Figura 17 y Figura 18 se puede observar la boquilla en 3D con sus respectivas vistas.



**Figura 17. Diseño boquilla 2 parte hembra, (medidas en mm)**



**Figura 18. Diseño boquilla 2 parte macho, (medidas en mm)**

Los ensayos experimentales con esta boquilla, evidenciaron que el diseño presentaba inconvenientes que impedían el desarrollo normal del CAF a través de la tubería. Uno de ellos fue la necesidad de que la caja acrílica donde se ensamblaba la boquilla (Figura 12) estuviera constantemente llena de agua presurizada, esto con el fin de

garantizar un flujo constante de agua por la boquilla, para lubricar la tubería formando así la sección anular del CAF. Esta condición, no muchas veces se puede lograr ya que el nivel del agua baja muy rápidamente a medida que se realizan los ensayos experimentales, no se alcanza a abastecer rápidamente de este fluido a la caja acrílica, lo que genera que el anillo no se desarrolle de la forma adecuada y no se logre mantener estable a lo largo de su recorrido, ocasionando que el fluido viscoso tenga contacto con las paredes internas de la tubería de pruebas. Para garantizar una presión adecuada del fluido lubricante, es importante garantizar la hermeticidad de la caja acrílica, en muchas ocasiones no se logra, lo que provoca una disminución de la presión del agua.

A raíz de los problemas presentados en este diseño, se opta por una nueva boquilla que elimine la necesidad de tener la caja llena con agua presurizada. Por el contrario, el fluido lubricante, llega directamente a la boquilla, garantizando un flujo constante y manteniendo la presión necesaria.

### 2.3 DISEÑO BOQUILLA 3

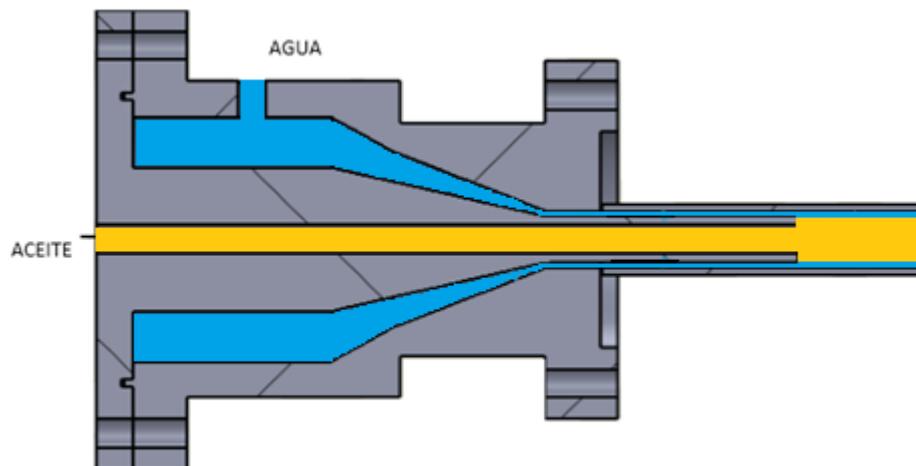
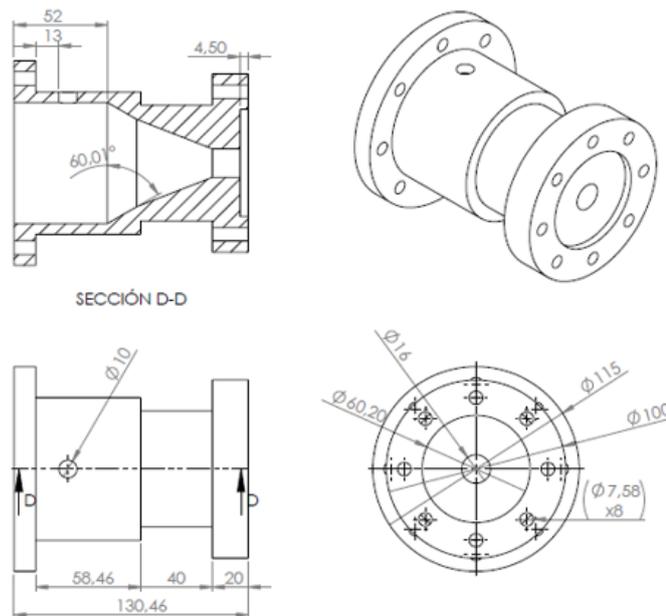


Figura 19. Boquilla 3

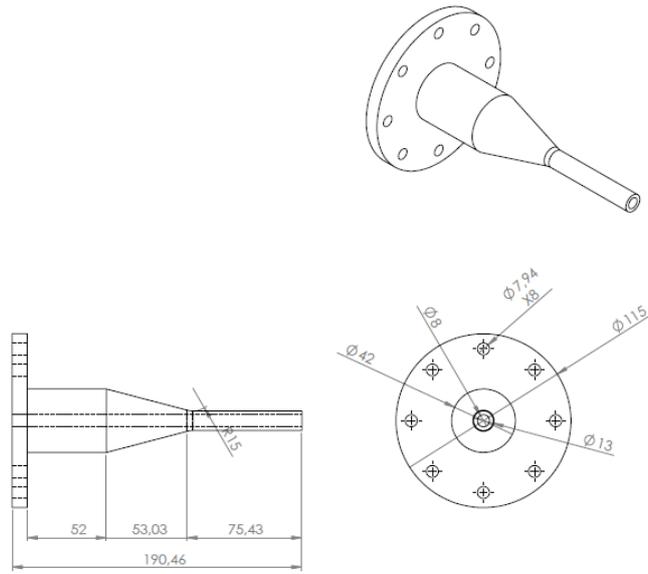
Esta boquilla cuenta con una sola entrada de agua que alimenta una precámara, la cual tiene como fin generar una distribución de presiones uniforme del agua antes de entrar al ánulo, ya que la presión actúa uniformemente en todas las direcciones, de igual

manera garantizar un flujo constante, que alimente el anillo. La boquilla en general está ensamblada en dos partes (parte hembra y parte macho) que permiten obtener la configuración geométrica del patrón de flujo anular.

La boquilla tiene una reducción gradual hasta llegar al diámetro del ánulo, esto con el fin de evitar las perturbaciones que se crean al existir cambios de secciones en el flujo del agua. El aceite es inyectado en la parte macho, fluyendo a lo largo de la boquilla hasta lograr formar un núcleo estable, y así entrar en contacto con el anillo de agua que se va formando en el exterior. Con este diseño se logrará mayor concentricidad en el flujo, ya que es un factor importante para el desarrollo de este patrón de CAF (figuras 21 y 22).



**Figura 20. Diseño boquilla 3 parte hembra, (medidas en mm)**



**Figura 21. Diseño boquilla 3 parte macho, (medidas en mm)**

### 3 BANCADA EXPERIMENTAL

El montaje se realizó con el fin de observar el patrón característico CAF, y realizar los análisis de la diferencia de presión para un esquema de flujo anular agua / aceite, en una tubería totalmente horizontal. El aceite utilizado durante todas las pruebas fue el SAE 85 W 140.

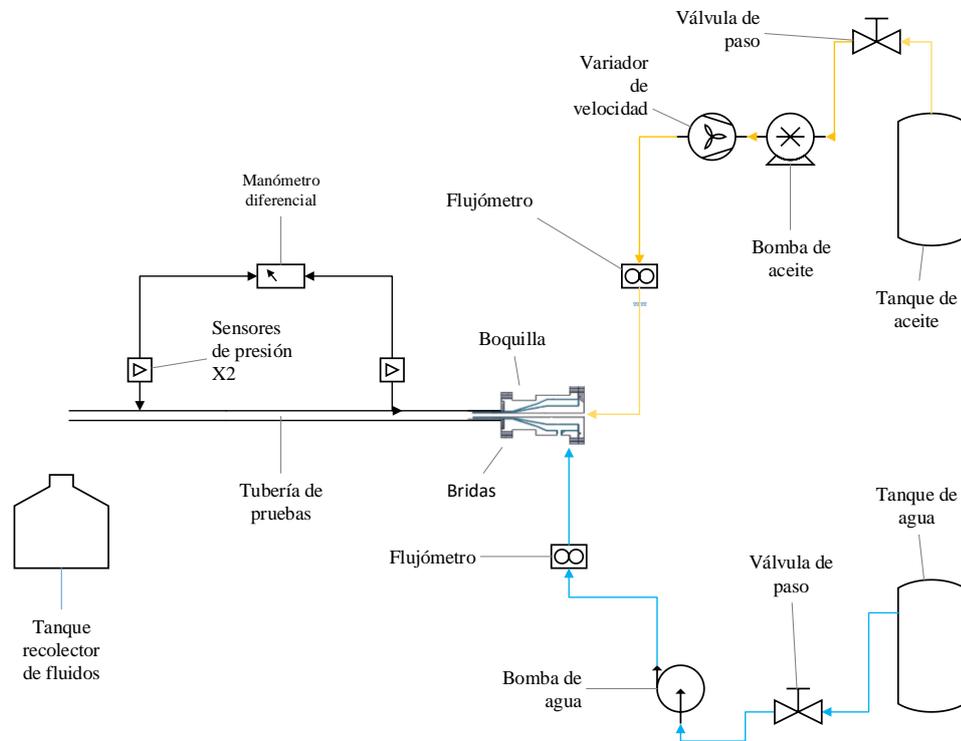
El montaje experimental consta de una tubería en acrílico transparente, con un diámetro interior igual a 16 mm, y una longitud total de 1950mm, el acrílico transparente es elegido por la facilidad de visualización del patrón del CAF.

El almacenamiento de los fluidos se da mediante dos recipientes, para el caso del fluido menos viscoso (agua) se cuenta con un tanque en acrílico con una capacidad de almacenamiento de 18 litros, para el aceite, se fabricó un tanque en acrílico transparente el cual está técnicamente aforado de tal manera que se pueda observar la reducción de volumen luego de encender la bomba impulsora de aceite.

Para aumentar el caudal del aceite se trabajó con una electrobomba de tipo diafragma con un motor de 1HP y cuenta con un variador de velocidad el cual es el encargado de alterar el caudal (aumentar y disminuir), mientras que el agua (no viscoso), es suministrada por una bomba multietapas serie VSE [30], con una potencia de 1,3HP. A la salida de la bomba de aceite se cuenta con un flujómetro tipo turbina marca *Dwyer* [31], y del medidor de flujo se transporta el aceite directamente a la boquilla de configuración geométrica. De igual manera la bomba del agua está conectada a un medidor de flujo tipo turbina marca *Dwyer* [31], de este equipo se conecta la boquilla.

La boquilla está fabricada en material EMPACK, cuenta con dos entradas, una para cada fluido, la de aceite, mediante un racor se hace la conexión desde el flujómetro hasta la boquilla con manguera de 8 mm, la entrada del agua se encuentra ubicada en la parte

superior cilíndrica, junto a ella se encuentra una salida que funciona como purga y cuenta con una válvula de paso.



**Figura 22. Bancada Experimental final**

Durante las pruebas se hace un análisis de la caída de presión a lo largo de la tubería para esto se instalan dos sensores de presión (pressure meter *full line*)[32], el primero ubicado a una distancia (a) de 145cm, esta distancia se toma como referencia desde la boquilla, y el segundo ubicado a una distancia (b) 30 cm, como se observa en el en la Figura 22. Estos sensores están directamente contados a un manómetro diferencial de presión, de donde se obtienen los datos para los cálculos de diferencia de presión.

### 3.1 FUNCIONAMIENTO BANCADA EXPERIMENTAL

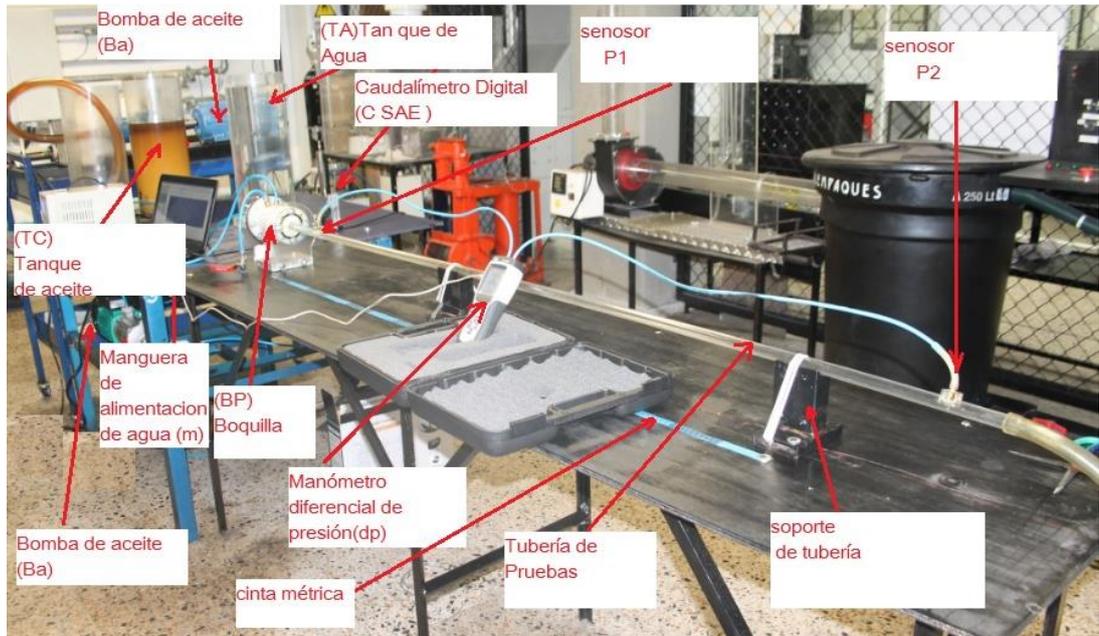
Para dar inicio a las pruebas se debe energizar la bomba de aceite a 220V y la bomba de agua a 110 V, al igual que los caudalímetros (C SAE – CH2O) a 12V. Se inspecciona que el manómetro diferencial de presión se encuentre con carga óptima para

realizar las pruebas. Se inspecciona que los tanques de almacenamiento de agua como de aceite cuenten con el suficiente líquido para realizar las pruebas, se recomiendan 10 litros de agua y 10 litros de aceite para una óptima prueba. Se verifica que el tanque recolector de fluidos se encuentre vacío.

Procedemos a realizar la prueba, accionando el encendedor de la bomba de agua al igual se abre la válvula de paso de la purga de la boquilla, dejamos transcurrir un tiempo aproximado de minuto y medio. Al paso de este tiempo se verifica que la tubería este totalmente llena de agua, se cierra la válvula de purga, si el caudalímetro de agua se encuentra encendido, se puede hacer lectura del caudal de agua que circula por la tubería.

Inmediatamente se enciende el variador de velocidad de la bomba de aceite, y se verifica la potencia a la cual se desea correr el aceite (desde el potenciómetro del variador de velocidad), se enciende el accionamiento del variador. En el caudalímetro de aceite ya se puede registrar el caudal de aceite, esperamos un tiempo aproximado de 3 segundos para observar la configuración geométrica obtenida por los dos fluidos dentro del tubo acrílico. Al circular los dos fluidos dentro de la tubería se puede hacer un registro datos controlados por tiempo en el manómetro diferencial de presión.

Una vez terminada la prueba se apaga, inicialmente el variador de velocidad, y dejamos circulando agua dentro de la tubería con la finalidad de hacer limpieza a la misma, para evitar que la bomba de agua trabaje en vacío, por tanto, se apaga cuando quede un litro o más agua en el tanque de almacenamiento.



**Figura 23. Bancada Experimental final partes**

### 3.2 SELECCIÓN DE FLUIDO VISCOSO

Para la adquisición del aceite se hace una observación de las propiedades del fluido a comprar, se toma como referencia la siguiente tabla de características, de donde se calcula los grados API.

Propiedades	SAE 85 w 140
Viscosidad 100°C	28,00cSt
Índice de viscosidad	97
Punto de inflamación °C	230
Punto de congelación °C	-18
Densidad a 15°C	0,910kg/L
Color	Visual Ambar

**Tabla 2: propiedades del SAE 85 W 140 Gulf Gear Mp [33].**

De la tabla anterior se obtiene la densidad del aceite (0,910Kg/L), con la cual se consigue gravedad específica (0,912), este valor es remplazado en la (ecuación 1). Y de esta forma dando como resultado  $API = 23,65^\circ$ .

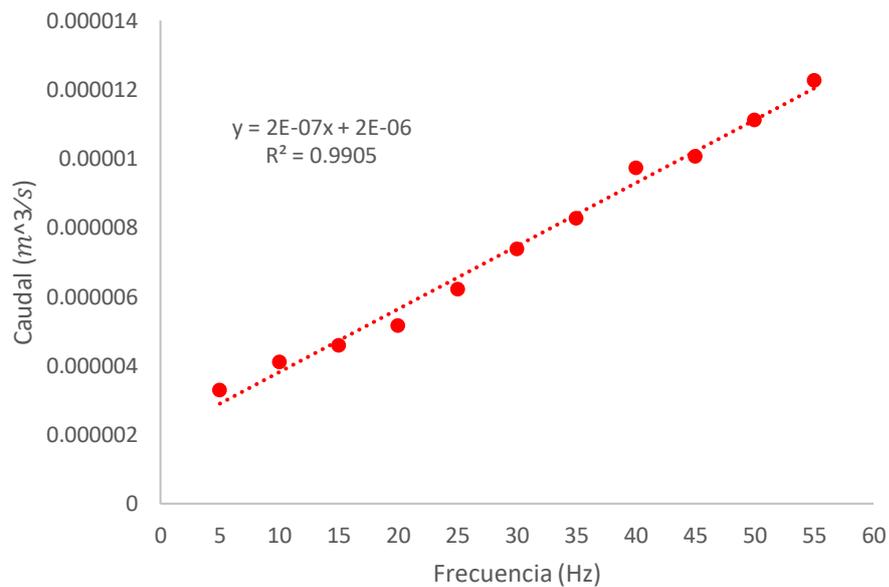
La gravedad API del aceite (23,65°) muy cercana a la característica del crudo pesados, por tal razón se selecciona el aceite SAE 85W140, como fluido viscoso para nuestra investigación.

### 3.3 SELECCIÓN DE BOMBAS

#### 3.3.1 Bomba de Aceite

La bomba seleccionada es una bomba tipo diafragma, este tipo de bomba está catalogada dentro de las bombas de desplazamiento positivo. Y se elige según lo investigado en [34].

A continuación, se muestra (Gráfica 1) la curva de calibración de la bomba de Aceite:



**Gráfica 1. Curva de Calibración Bomba de Aceite**

La Gráfica 1 relaciona la frecuencia (Hz) de la bomba, mostrada por el variador de velocidad de la misma y el caudal entregado por la bomba (m<sup>3</sup>/s), esto con el fin de

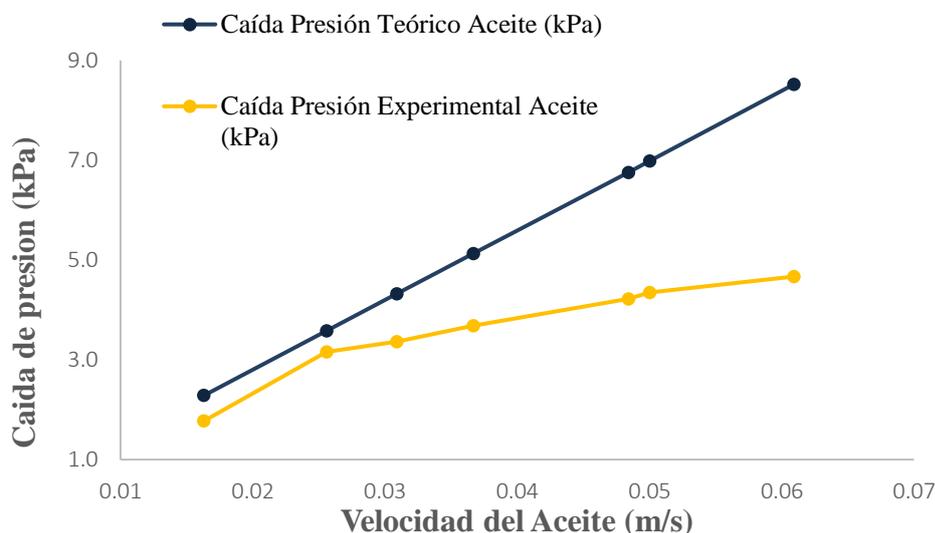
poder conocer el caudal con solo el valor de la frecuencia obtenido del variador de velocidad, representada por la ecuación  $Y = 2 \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-6}$ .

### **3.3.2 Bomba De Agua**

Se utiliza una bomba de 6 etapas ensamblada a un motor monofásico con potencia de 1, 3HP.y entrega un caudal máximo igual a 17 galones por minuto [30].

## 4 RESULTADOS

### 4.1 VALIDACIÓN DE LA BANCADA EXPERIMENTAL



**Gráfica 2. Validación Bancada Experimental**

La caída de presión transportando solo aceite fue calculada de acuerdo a la ecuación de la energía de Bernoulli. Se tuvieron en cuenta la energía cinética debida a la velocidad del fluido y la energía de flujo que está relacionada con la cantidad de trabajo necesario para mover el fluido a través de cierta sección [9]. Se tuvo en cuenta las pérdidas de energía debida a la fricción que hay entre el fluido y las paredes internas de las tuberías por donde circula. Nótese que el fluido teóricamente se comporta como un fluido newtoniano, ya que existe una relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad, a medida que se aumenta la velocidad aumenta la deformación del fluido. Los resultados experimentales muestran una similar tendencia que los resultados teóricos, a medida que aumenta la velocidad del fluido aumenta la caída de presión, por lo tanto, la bancada experimental trabaja conforme a la ecuación general de la energía de Bernoulli, relacionando la energía potencial, cinética, y de presión.

#### 4.1.1 CÁLCULOS CAÍDA DE PRESIÓN PARA TRANSPORTE DE SOLO ACEITE

Para obtener el valor de la caída de presión en la tubería, se tuvieron en cuenta los siguientes datos: El diámetro interno de la tubería ( $D= 0,016$  m), el cual es el que está en contacto con el fluido de trabajo, el caudal del aceite máximo otorgado por la bomba ( $Q= 0,735$  L/min) y la viscosidad dinámica del fluido ( $\mu = 0,639$  Pa. S).

Con los datos anteriores, calculamos la velocidad ( $v$ ) con la que es transportado el fluido de trabajo, para esto utilizamos ( $D= 0,016$  m) y calculamos el área ( $A$ ) de una sección transversal de la tubería, definida como “el volumen de un fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo” [24].

Una vez obtenemos la velocidad ( $v= 0,0609$  m/s) del fluido de trabajo, procedemos a calcular el número de Reynolds, con el fin de determinar la relación de las fuerzas inerciales movimiento del fluido. Para esto utilizamos la (ecuación 2), y obtenemos  $N_R = 1,3882$ . El ( $N_R$ ) es menor a 2000, considerándolo un flujo laminar para nuestro estudio.

Luego de conocer el número de Reynolds, procedemos a calcular las pérdidas mayores y menores. Para nuestro estudio solo tenemos en cuenta las pérdidas mayores, que son las producidas por la fricción que se da entre las paredes internas de la tubería y el fluido en movimiento. Para esto tenemos presente la (ecuación 3), conocida como la ecuación de Darcy. (ecuación 3): 
$$h_L = f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

Siendo ( $f$ ) el factor de fricción, ( $v$ ) la velocidad promedio del fluido, ( $D$ ) el diámetro interno de la tubería, ( $L$ ) la longitud del recorrido del fluido, y ( $g$ ) la gravedad.

El factor de fricción se calcula, teniendo en cuenta la (ecuación 4), para flujo laminar (ecuación 4):  $f = \frac{64}{NR} = 46,10$

Luego de obtener el valor del factor de fricción, determinamos el valor de las pérdidas mayores producidas por la fricción, y obtenemos  $h_L = 0,9549 m$

Posteriormente planteamos la ecuación general de la energía, que involucra las pérdidas mayores y menores. Para nuestro estudio solo tenemos en cuenta las pérdidas mayores producidas por la fricción entre el fluido de trabajo y las paredes internas de las tuberías, y obtenemos la (ecuación 5):  $\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g}$

Las consideraciones que nosotros tenemos en cuenta para nuestro análisis son las siguientes:

1.  $Z_A$  y  $Z_B$  obtienen valores de 0 (cero), debido a que nuestro eje de referencia es la misma tubería, y al ser esta horizontal y paralela a nuestro eje de referencia, estas variables toman el valor de cero.
2.  $V_A$  y  $V_B$  son iguales, por lo cual la diferencia de las mismas es igual a Cero, debido a que la tubería de pruebas no tiene cambios de secciones.

Debido a lo anterior la nueva ecuación general de la energía nos queda simplificada, obteniendo (ecuación 6):  $\frac{P_A}{\gamma} - h_L = \frac{P_B}{\gamma}$

Por lo tanto, la caída de presión descrita en (ecuación 7):  $\Delta_P = (h_L) (\gamma)$

$$\Delta_P = (0,9549 m) \left[ \left( 910 \frac{Kg}{m^3} \right) \left( 9,8 \frac{m}{s^2} \right) \right]$$

$$\Delta_P = 8,516 kPa$$

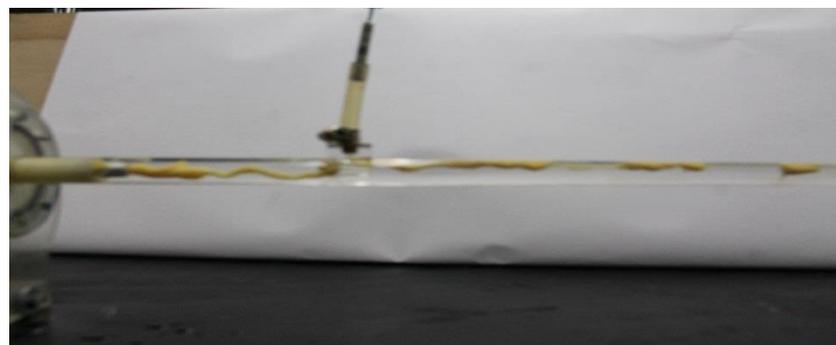
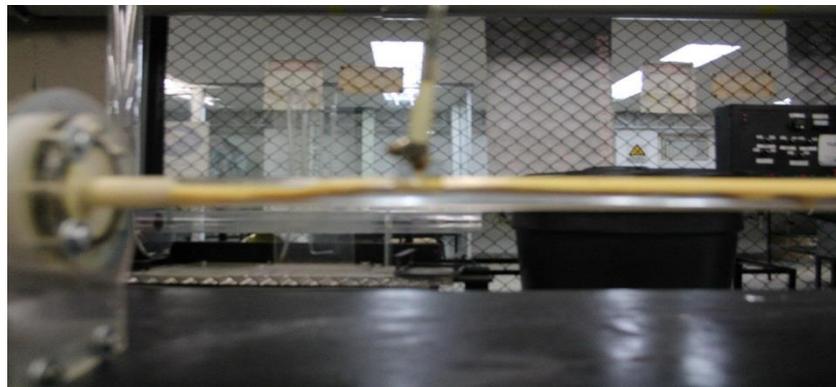
Estos cálculos son una muestra de cómo se sacaron los resultados teóricos a diferentes velocidades del aceite.

#### **4.2 OBSERVACIONES PATRÓN DE FLUJO CAF**

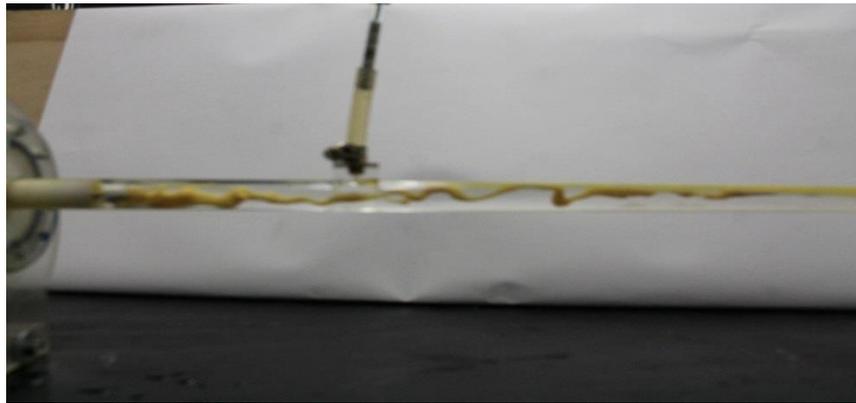
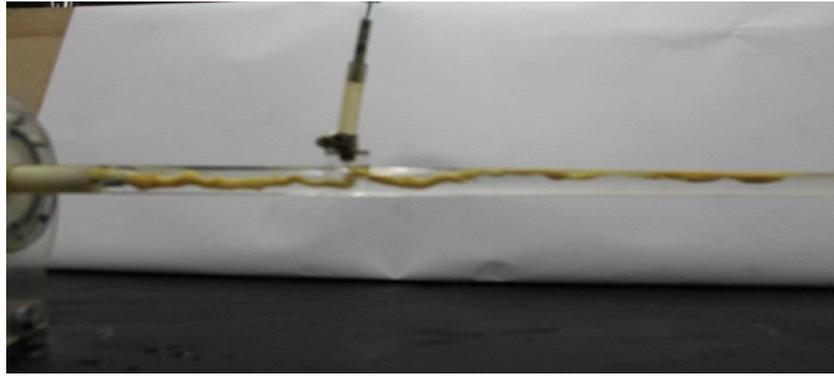
En la Figura 24, se puede observar los resultados de las pruebas realizadas en la parte experimental. Las imágenes se dividen en 5 etapas, donde se aumentó la velocidad del aceite y se mantuvo constante la velocidad del agua, esto con el fin de determinar qué papel juega la velocidad del aceite para el desarrollo de patrón de flujo CAF. Se trabajaron 5 velocidades distintas del aceite, iniciando con una velocidad baja hasta llegar a la máxima velocidad, las cuales fueron a: 0,0163 m/s, 0,0228 m/s, 0,0411 m/s, 0,0500 m/s y 0,0609 m/s, mientras que la velocidad del agua fue 0,25033, siempre está siendo constante.

Cuando la velocidad del aceite era 0,0163 m/s, (a) siendo esta la más baja y a velocidad constante del agua, se evidenció un poco de flujo anular al inicio de la tubería, para posteriormente estratificarse, y en algunas ocasiones producirse dispersión de aceite en agua, desarrollando estos patrones de flujo a lo largo de la tubería de pruebas. Al aumentar la velocidad del aceite a 0,0228 m/s (b), se observa un poco más de desarrollo del patrón de flujo CAF, pero este flujo no es un perfecto CAF, si no se produce un flujo ondulado. Las ondas desarrolladas en la interface lograron tocar las paredes internas de la tubería, ocasionando suciedad en la misma, para posteriormente producirse una estratificación. Se nota una capa muy delgada de aceite en la parte superior de la tubería, la cual se produce a lo largo de la misma debido a las bajas velocidades del aceite. A velocidades de 0,0411 m/s, y 0,0500 m/s (c-d), se observa un mayor desarrollo del patrón de flujo CAF, el núcleo se ve con más volumen a comparación de los anteriores patrones desarrollados a las velocidades mencionadas, y se logra trasportar más aceite. A estas velocidades se observa un CAF ondulado, pero estas ondulaciones son menores a las

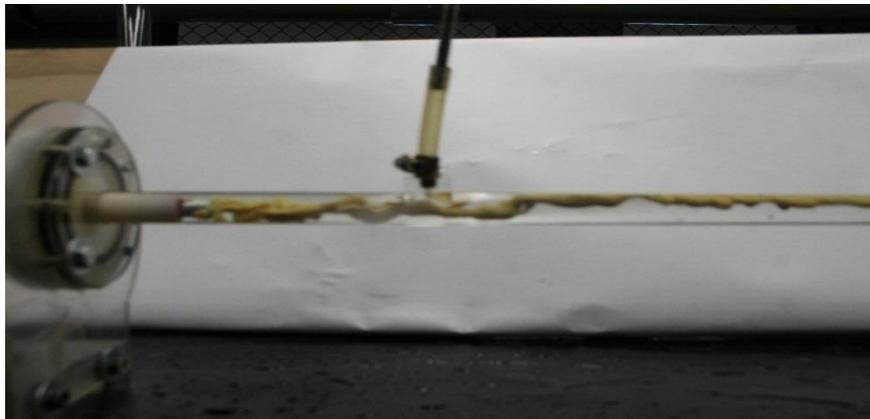
anteriores, lo cual permite un mejor desarrollo del patrón de flujo, y se logra sostener por más distancia, para después producir una estratificación. A estas velocidades se observan un flujo “slug”, en las que las burbujas de aceite coalescen y forman los famosos slugs o tapones, los cuales ocupan la parte superior de la tubería, después estos slugs se unían formando la estratificación del fluido. Por ultimo a una velocidad del aceite de 0,0609 m/s (e) se observa que el patrón de flujo CAF se desarrolla por más distancia, el núcleo tiene mayor volumen de aceite y al inicio se ve un núcleo más continuo pero después se desarrolla un CAF ondulado. Se puede demostrar con estas 5 etapas de modificación de velocidades del aceite que el patrón de flujo Anular se desarrolla más, y el núcleo empieza a ocupar más volumen de la sección transversal de la tubería, y se mantiene por más tiempo y distancia.



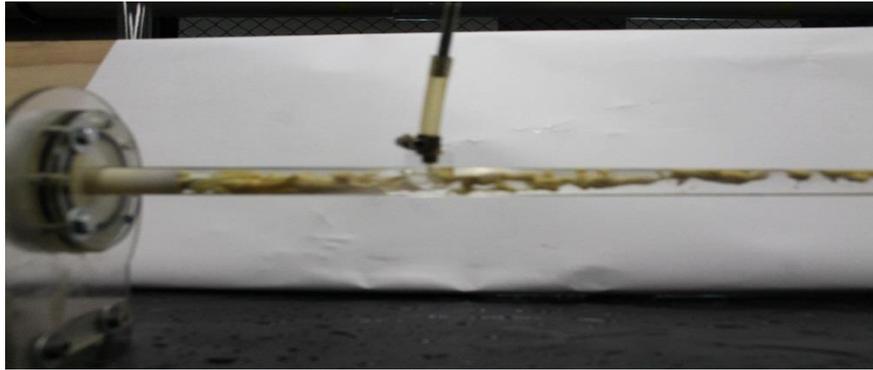
a). ( $V_o=0,0163 \text{ m/s}$   $V_w=0,25033 \text{ m/s}$  )



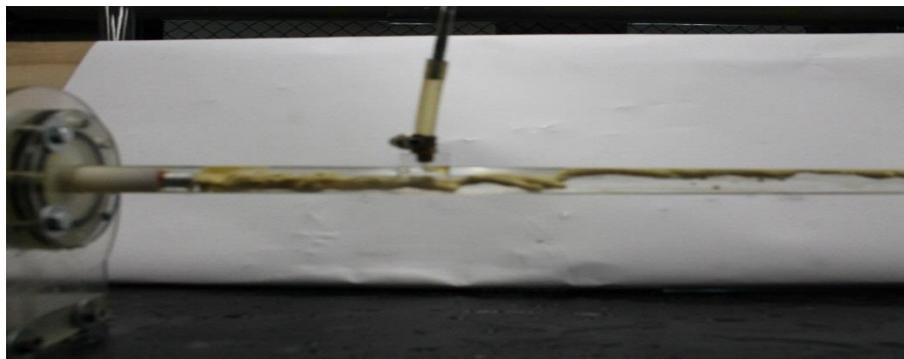
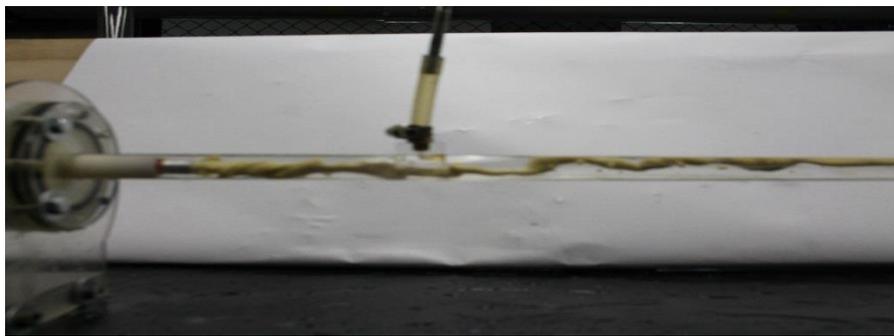
b).



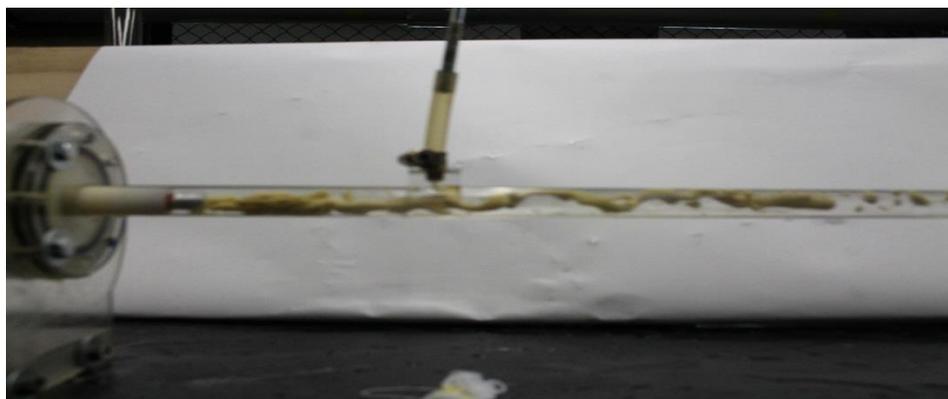
( $V_o=0,0228 \text{ m/s}$   $V_w=0,25033 \text{ m/s}$  )

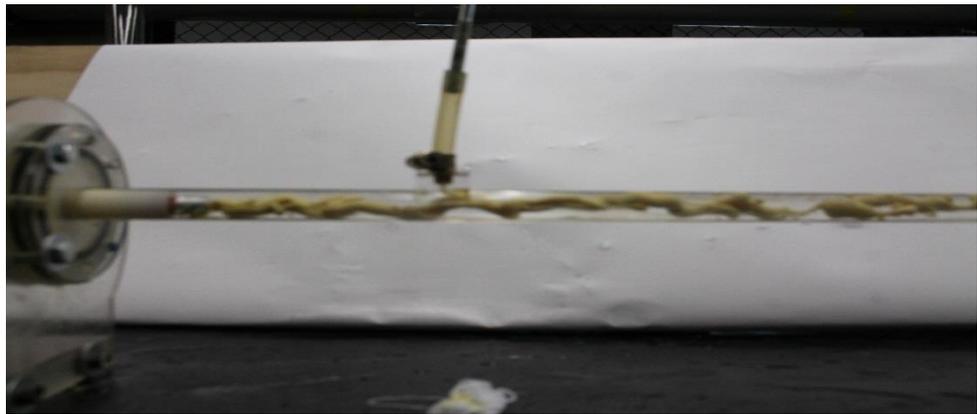
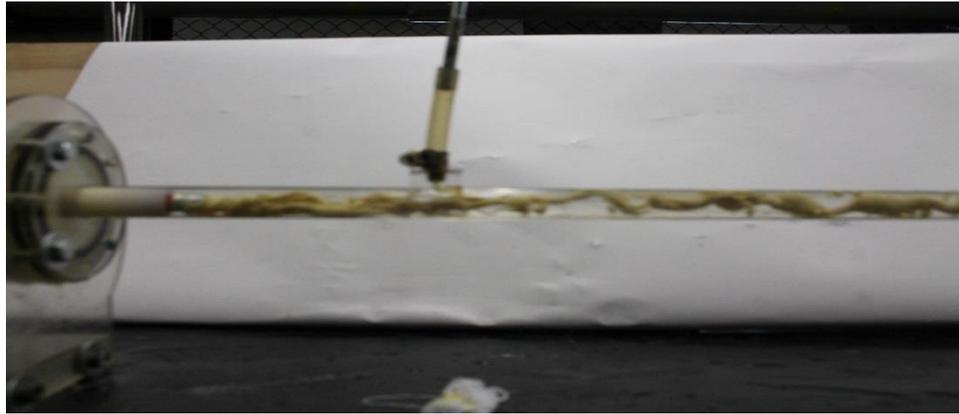


C. ( $V_o=0,0411 \text{ m/s}$   $V_w=0,25033 \text{ m/s}$  )



d). ( $V_o=0,0500 \text{ m/s}$   $V_w=0,25033 \text{ m/s}$  )





**Figura 24. Patrones de flujo desarrollados en las prácticas experimentales**

$$e). (V_o=0,0609 \text{ m/s} \quad V_w=0,25033 \text{ m/s} )$$

El régimen de flujo anular se consiguió a ciertas distancias, ya que después se observó un flujo segregado, donde las dos fases están separadas. La fase más densa fluye en el fondo de la tubería y la fase menos densa fluye en la parte superior.

También en algunas partes del flujo, se presentaron emulsiones, donde el agua se encontraba como una fase continua, y el aceite en formas de gotas dispersas en el agua, la cual fluía hasta el final de la tubería. Esto debido a la poca cantidad de aceite que fluía, en los tramos finales de la tubería. Las moléculas de aceite no tienen otras iguales, para cohesionar, por ende, las moléculas de aceite empujan contra la presión de las moléculas de agua que lo rodean, y se formaron gotas de aceite. Al ser el agua más densa que el aceite, las gotas de aceite fueron presionadas a salir por la superficie del agua.

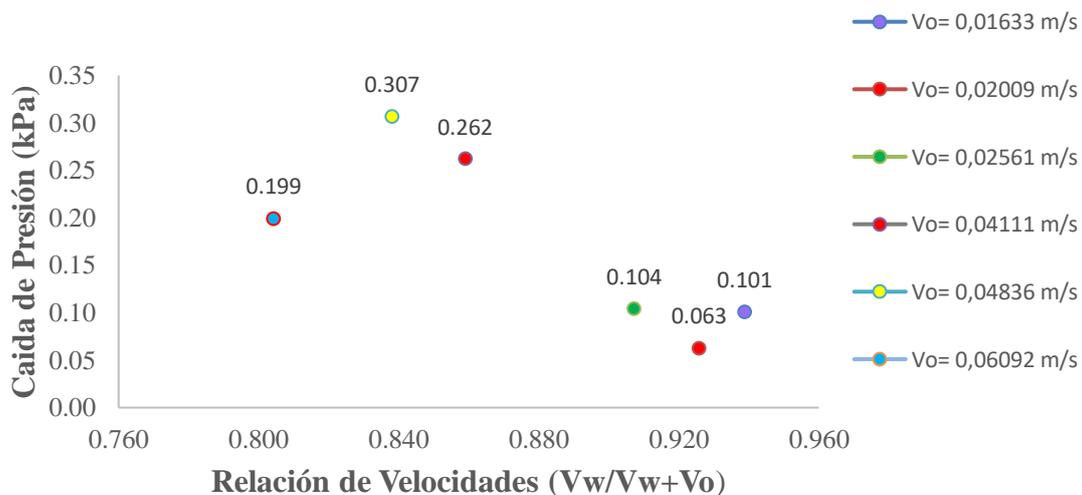
### 4.3 RESULTADOS CAÍDA DE PRESIÓN CAF

Martínez. et. al[13], y Bannwart [35], entre otros autores afirman que la caída de presión obtenida transportando el aceite o fluido viscos por el método de flujo anular es comparable como si solo se transportará agua. Para las gráficas se tiene en cuenta lo siguiente:

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{V_w}{V_w + V_o} \text{ (ecuación 8).}$$

Presentamos ahora los datos de la caída de presión del patrón de flujo CAF, obtenidos de un transductor de diferencia de presión, se mantuvo constante la velocidad del agua y se varió la velocidad del aceite.

Se tomaron datos de caída de presión con 6 velocidades distintas del aceite y una velocidad constante del agua mostradas en la Gráfica 3. Nótese las variaciones que hay de la caída de presión entre las 6 distintas velocidades seleccionadas. Se tomaron 10 datos distintos de caída de presión con un lapso de tiempo entre cada iteración de 30 segundos, con cada una de las velocidades de aceite. Se muestran los valores promedios de caída de presión a las 6 velocidades seleccionadas.



Gráfica 3. Caída de presión promedio Experimental CAF

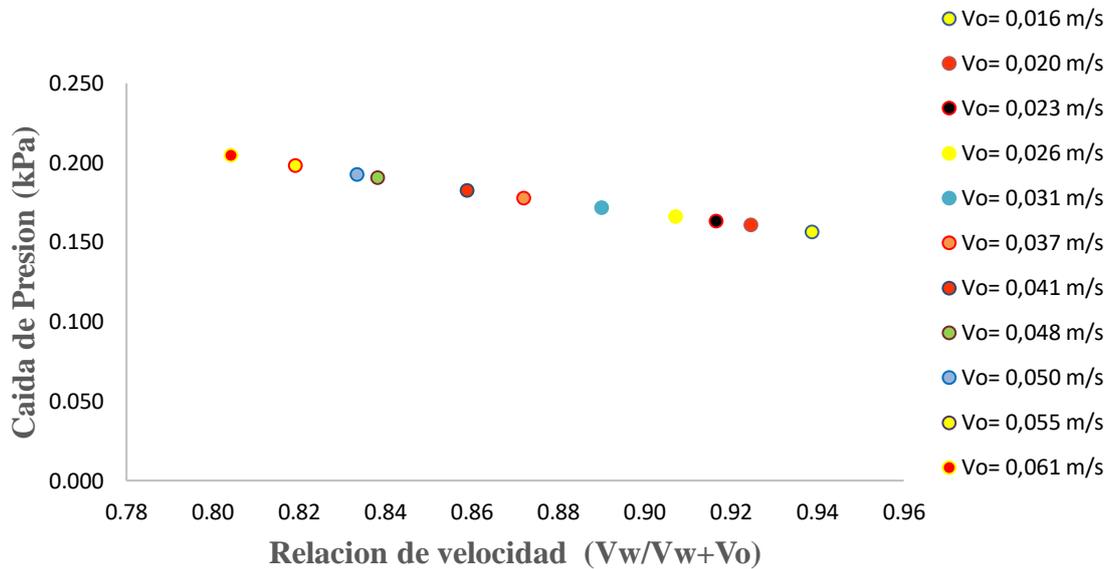
Se observa que a una menor relación de velocidades de 0,804 la caída de presión es de 0,199 kPa para una velocidad máxima del aceite de 0.06092 m/s, con esta velocidad del aceite y una velocidad constante del agua, se logró los mejores resultados de patrón de flujo CAF. Posteriormente incrementándose la relación de velocidades a 0,838, se ve un aumento de la caída de presión de 0,108 kPa con respecto a la relación de velocidad de 0,804, siendo esta la máxima caída de presión conseguida, a una velocidad del aceite de 0,04836 m/s.

Con las relaciones de velocidad de 0,859, 0,907, y 0,926, se evidencia una disminución progresiva de la caída de la presión, a medida que va aumentando la relación de velocidad, nótese que a medida que aumenta la relación de velocidades, disminuye la velocidad del aceite, esto debido a que a menor velocidad del aceite el régimen de flujo de estudio no se logró desarrollar, esto véase en la sección 8,2. Como se mencionó anteriormente se puede observar ciertas variaciones de la caída de presión al aumentar la velocidad del aceite, esto debido a las transiciones del régimen del flujo anular (CAF) al régimen de flujo estratificado, debido a que el flujo del CAF no se mantuvo más de 1 m de distancia. La mejor distancia alcanzada fue de 1 m aproximadamente manejando una velocidad del aceite de 0,0609 m/s, y una velocidad del agua de 0,25032 m/s, posteriormente el comportamiento del flujo pasó de un CAF ondulado a un régimen estratificado muy corto, y posteriormente una emulsión de aceite en agua hasta el final de la tubería. Cada vez el núcleo iba perdiendo volumen y se evidenciada más cantidad de agua por lo que al final se formaban grandes gotas de aceite que eran expulsados por el agua por la parte superior de la tubería, esto se debe a que la caída de presión a esta velocidad específica sea menor, puesto que se vio poco ensuciamiento de aceite en la parte final de la tubería.

## 4.4 COMPARACIONES

### 4.4.1 CAÍDA DE PRESIÓN TEÓRICA CAF Y TEÓRICA ACEITE

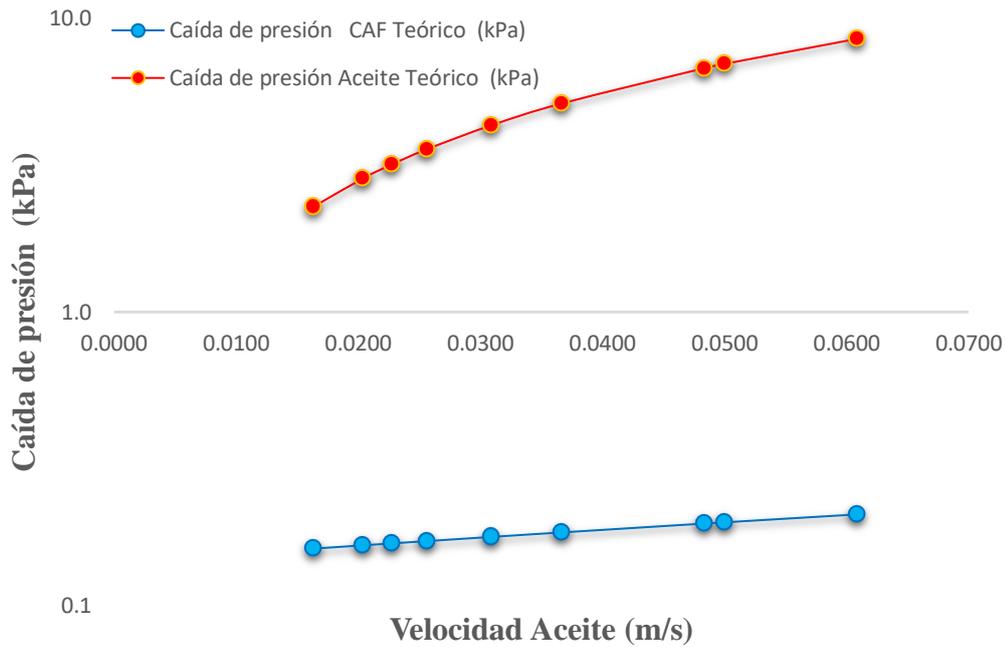
A continuación, se muestra la caída de presión teórica del patrón de flujo CAF:



Gráfica 4. Caída de presión teórica CAF

Manteniendo las mismas condiciones de la parte experimental, se observa que la Caída de presión es baja, variando entre un rango de 0,157 kPa y 0,205 kPa, la velocidad del aceite se varió entre un rango de 0,016 m/s y 0,061 m/s, manteniendo constante la velocidad del agua de 0,25032 m/s. A medida que la velocidad del aceite fue aumentando, la caída de presión también aumentó, hasta un valor máximo de 0,205 kPa, con una velocidad del aceite de 0,061 m/s, esto se debe a que el número de Reynolds es directamente proporcional a la velocidad.

Se procedió a calcular la caída de presión transportando solo aceite a las mismas velocidades del aceite. Nos referimos Aceite teórico al considerar el transporte de solo aceite por la tubería, y se obtuvo lo siguiente:



**Gráfica 5. Caída de presión teórica CAF vs Solo Aceite**

A una velocidad inicial de 0,016 m/s para el aceite, tanto para el patrón de flujo CAF, como para el transporte de solo aceite, se obtiene una gran diferencia de los resultados. A esa velocidad del aceite y con la velocidad del agua que se ha venido trabajando la caída de presión teórica obtenida fue de 0,157 kPa con el método de transporte CAF, mientras que transportando solo aceite a la misma velocidad de 0,016 m/s la caída de presión fue de 2,283 kPa, siendo esta 93,12 % mayor aproximadamente.

Con una velocidad máxima del aceite de 0,061 m/s y trabajando con la velocidad constante del agua, la caída de presión obtenida fue de 0,205 kPa para el CAF, mientras que el transporte de solo aceite con esta misma velocidad se obtuvo una caída de presión de 8,516 kPa, siendo esta aproximadamente 97,59 % mayor que la obtenida con el CAF. En la gráfica 5 se evidencia la gran diferencia en el transporte de fluidos viscosos por el método de flujo anular y el transporte de solo aceite. Esto se debe principalmente a que el fluido que está en contacto con las paredes internas es el agua, reduciendo esto las pérdidas por fricción debida a la baja viscosidad que presente el agua al moverse.

#### 4.4.1.1 CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN PARA EL PATRÓN DE FLUJO CAF

Para determinar la caída de presión del patrón de flujo CAF, nos apoyamos del trabajo realizado Arney [36], en el cual se muestra un modelo matemático para determinar la caída de presión del flujo anular, el cual tiene presente las viscosidad dinámicas de los dos fluidos, las densidades, las velocidades y otros parámetros importantes del régimen de flujo CAF. Se darán a conocer las fórmulas utilizadas para la obtención del delta de presión, para mayor información acerca de cómo se obtuvieron, se aconseja revisar el documento mencionado.

Arney [36] define dos variables importantes al inicio del documento, una denominada la fracción de entrada de agua y la otra la fracción volumétrica de retención por una fórmula empírica: Siendo:  $(Q_W)$  el caudal volumétrico del agua y  $(Q_O)$  caudal volumétrico del aceite :  $C_W = \frac{Q_W}{Q_W + Q_O}$  (ecuación 9).

Fracción volumétrica de retención: Relacionada con la fracción de entrada del agua  $H_W = C_W [1 + 0,35 (1 - C_W)]$  (ecuación 10).

Arney [36] analiza el fluido en movimiento utilizando un análisis relacionado con la composición densidad de la mezcla, y obtiene (Ecuación 11)  $\rho_c = (1 - n^2)\rho_w + n^2\rho_o$

Siendo n calculada por (ecuación 12):  $n = \sqrt{1 - H_w}$

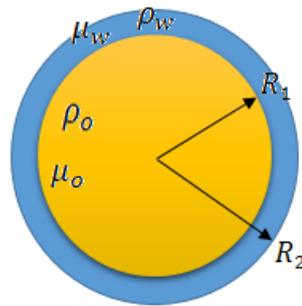
Arney en su investigación propone la siguiente expresión para determinar el número de Reynolds, luego de desarrollar un modelo matemático, donde relaciona la viscosidad dinámica del agua y el aceite, la densidad de la mezcla, y la velocidad promedio:  $Re_{Arney} = \frac{\rho_c D V_p}{\mu_w} [1 + n^4 (\frac{\mu_w}{\mu_o} - 1)]$  (ecuación 13)

La ecuación planteada por Arney para determinar factor de fricción, relacionada con el número de Reynolds de Arney ( ecuación 14):  $\lambda_{Arney} = \frac{0,316}{Re_{Arney}^{0,25}}$

Por último, define la caída de presión, con la siguiente (ecuación 15):

$$\Delta P = \frac{\lambda_{Arney} \rho_c L V p^2}{2 D_2}$$

Para obtener el valor de la caída de presión en la tubería, se tuvieron en cuenta los siguientes datos: el caudal del agua y el aceite, el diámetro interno de la tubería de pruebas, el diámetro teórico del núcleo de la configuración geometría del patrón de flujo, la densidad de los dos fluidos, y la viscosidad dinámica de los fluidos.



**Figura 25. Análisis del CAF, Tomado Arney et. al. [36].**

$D_1 = 0,012$  m (Este diámetro hace referencia al diámetro teórico del núcleo de aceite, está dado por diseño de la (boquilla 3) caudal entregado por la bomba de agua ( $Q_w = 3,02$  L/min) y caudal entregado por la bomba de aceite ( $Q_o = 0,735$  L/min), otras variables a tener en cuenta son : el diámetro interno de la tubería ( $D_2 = 0,016$  m), la densidad del agua ( $\rho_w = 999,1$  Kg/m<sup>3</sup>), la densidad del aceite ( $\rho_o = 910$  Kg/m<sup>3</sup>), viscosidad dinámica del agua ( $\mu_w = 1,139 \times 10^{-3}$  Kg/m s) y la viscosidad dinámica del aceite. ( $\mu_o = 0,639$  Kg/m s)

Primeramente determinamos los valores de  $C_W$  y  $H_W$  con las (ecuaciones 9 y 10) respectivamente, y obtenemos  $C_W = 0,8042$  y  $H_W = 0,8593$ .

Determinamos el valor de la densidad de la mezcla, y obtenemos:  
 $\rho_c = (1 - n^2)\rho_w + n^2\rho_o$  Siendo (n):  $n = \sqrt{1 - 0,8593} = 0,37503$  obteniendo como resultado  $\rho_c = 986,568 \text{ Kg/m}^3$

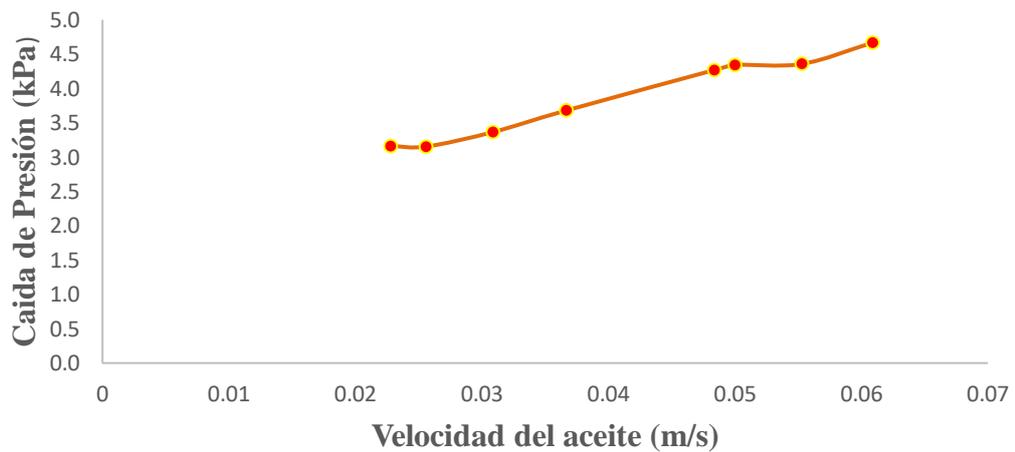
Determinamos la velocidad promedio de la mezcla, utilizando la siguiente (ecuación 16)  $V_P = \frac{4(Q_O + Q_W)}{\pi D_2^2} = 0,311247 \text{ m/s}$

Determinados el número de Reynolds de Arney, utilizando la (ecuación 13) y obtenemos:  $Re_{Arney} = 4228,316$  determinamos el factor de fricción de Arney, utilizando la (ecuación 14) y obtenemos:  $\lambda_{Arney} = 0,03918$  por ultimo determinamos la caída de presión a lo largo de la tubería, utilizando el patrón de flujo CAF, como fluido de trabajo, utilizando la (ecuación 15) , y obtenemos:  $\Delta_P = 0,2048 \text{ kPa}$

Estos cálculos son una muestra de cómo se sacaron los resultados teóricos a diferentes velocidades del aceite, y a una velocidad constante del agua, la compilación de los resultados teóricos se mostrará a continuación.

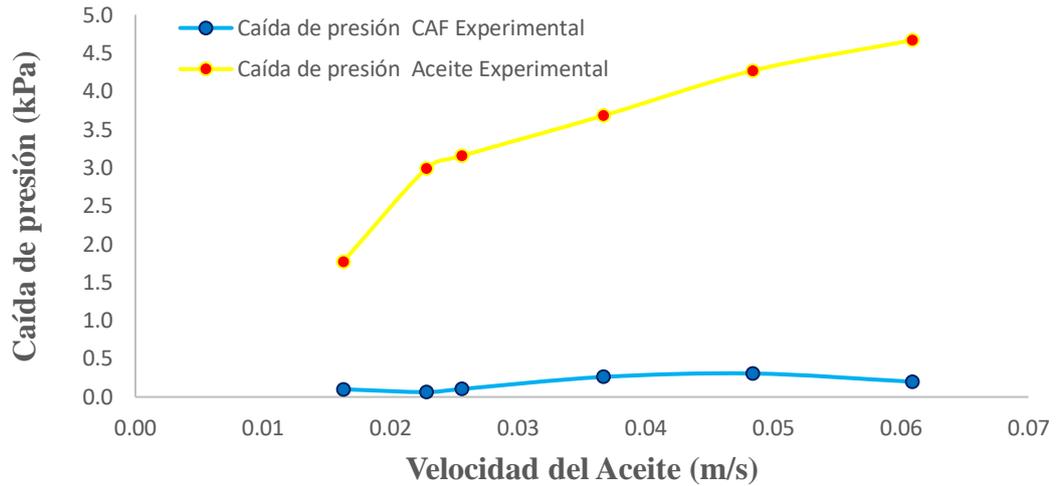
#### 4.4.2 CAÍDA DE PRESIÓN EXPERIMENTALES CAF Y EXPERIMENTALES ACEITE

Se tomaron datos de caída de presión transportando solo aceite, con el fin de poder compararlos con los obtenidos con el régimen de flujo CAF. Los datos se muestran a continuación.



**Gráfica 6. Caída de presión promedio Experimental Solo Aceite**

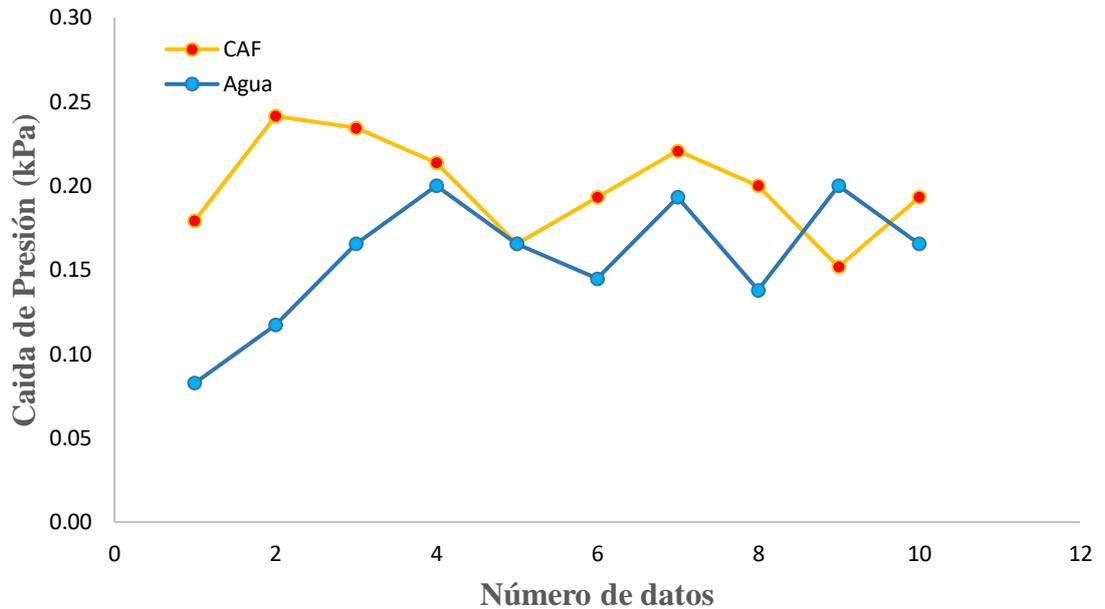
Se tomaron 8 datos distintos de caída de presión con un lapso de tiempo entre cada iteración de 30 segundos para cada una de las velocidades, y se utilizaron las mismas velocidades que en el régimen de flujo CAF. Nótese que a medida que se aumenta la velocidad del aceite la caída de presión aumenta, llegando a un valor máximo de 4,67 kPa a una velocidad de 0,0609 m/s. Ahora comparemos los valores promedios obtenidos con el patrón de flujo CAF, y los obtenidos con el flujo de solo aceite (ver grafica 6).



**Gráfica 7. Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_w=cste= 0,25032$  m/s) vs Solo Aceite**

Como se puede ver en la Gráfica 7, la diferencia que hay entre transportar aceite con el patrón de flujo CAF y transportarlo solo. La máxima caída de presión obtenida con el patrón de flujo CAF fue de 0,307 kPa mientras que la máxima obtenida transportando solo aceite fue de 4,67 kPa. El CAF se desarrolló mejor a una velocidad máxima de prueba de 0,0609 m/s en el cual se obtuvo una caída de presión de 0,199 kPa, mientras que fluir solo aceite a una mínima velocidad de prueba de 0,01633 m/s se obtuvo una caída de presión de 1,772 kPa, siendo esta 88,76 % mayor que la obtenida con el CAF a una velocidad máxima de prueba. Y si comparamos a las mismas velocidades de 0,0609 m/s obtenemos que la caída de presión obtenida transportando solo aceite es 95,73 % mayor a la conseguida mediante el patrón de flujo CAF. Estas diferencias se deben a que, en el método del CAF, el fluido que está en contacto con las paredes internas de la tubería es el agua, reduciendo así las pérdidas por fricción, debido a que la viscosidad es muchas más baja que la del aceite.

#### 4.4.3 CAÍDA DE PRESIÓN CAF EXPERIMENTAL VS AGUA EXPERIMENTAL

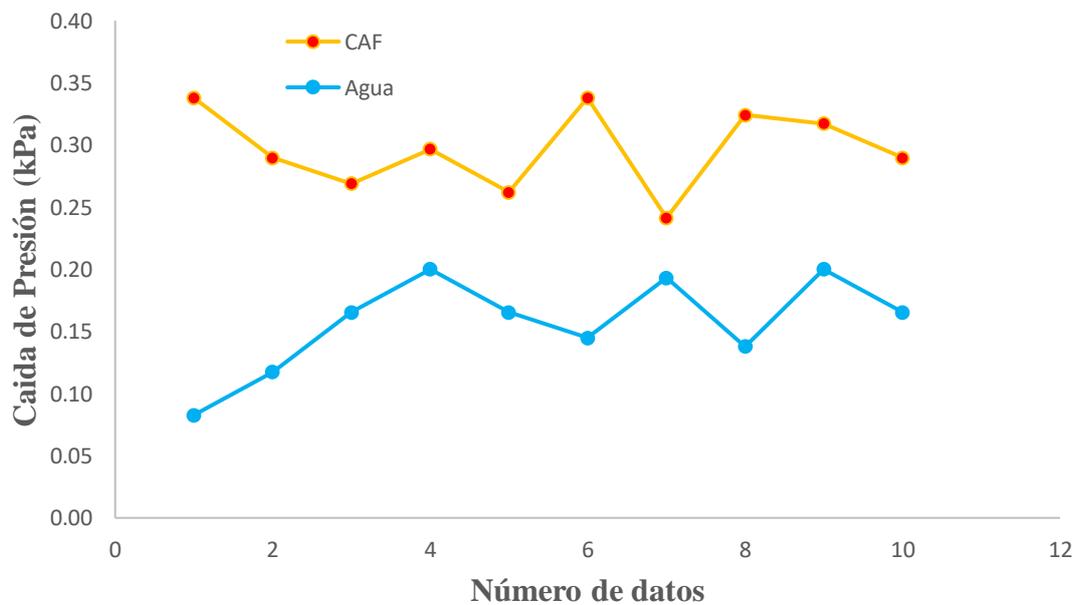


**Gráfica 8.** Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_o=0,0609$  m/s;  $V_w=0,25032$  m/s) vs Solo Agua ( $V_w=0,25032$  m/s)

En la (Gráfica 8) se puede evidenciar que la caída de presión con este patrón de flujo es comparable transportando solo agua a través de la tubería, se relaciona la caída de presión del CAF y transportar solo agua, con el número de datos recogido en el experimento con un intervalo de 30 segundos. Se tomaron 10 datos de caída de presión de solo agua a una misma velocidad, y 10 datos de caída de presión con el CAF con la misma velocidad del aceite y del agua. En promedio la caída de presión con el patrón de flujo fue de 0,199 kPa mientras que la del agua fue de 0,157 kPa, siendo el CAF 21,10 % mayor que la del agua, estando muy cerca a la que se obtiene transportando solo agua, y teniendo en cuenta que el CAF no fue estable en toda la tubería, se presentaron otros patrones de

flujos. En la prueba de solo agua la velocidad del agua fue de 0,25032 m/s, y se compara con el CAF a máxima velocidad de prueba del aceite de 0,0609 m/s, ya que a esta velocidad se notó que el CAF se desarrolló de mejor manera que las anteriores velocidades.

En la (Gráfica 9), se puede ver otra comparación de la caída de presión experimental CAF vs Agua, en esta la velocidad del aceite fue de 0,04114 m/s, menor a la anterior. En esta gráfica se puede observar que la caída de presión es mucho mayor a la del agua, en comparación con la que se vio con una velocidad del aceite mayor. La caída de presión promedio del agua fue igual a la anterior de 0,1572 kPa, mientras que la caída de presión promedio del CAF (con una menor velocidad del aceite) fue de 0,296 kPa, 32,78 % mayor a la anterior, y 46,89 % mayor a la del agua. Esto se debe principalmente a que el CAF se desarrolló menor distancia, y se produjo una estratificación temprana de los fluidos provocando una mayor caída de presión, debido a que el aceite logró tocar las paredes de la tubería.



**Gráfica 9. Caída de presión promedio Experimental CAF ( $V_o= 0,04114$  m/s;  $V_w=0,25032$  m/s) vs Solo Agua ( $V_w=0,25032$  m/s)**

#### 4.4.3.1 Cálculo caída de presión para transporte de solo agua

Para obtener el valor de la caída de presión en la tubería solo transportando agua, se tuvieron en los mismos datos anteriores: ( $D= 0,016$  m), ( $Q= 3,02$  L/min) y viscosidad cinemática  $\nu = 1,139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Con los datos anteriores, calculamos la velocidad con la que es transportado el fluido de trabajo ( $v= 0,25032$  m/s), procedemos a calcular el número de Reynolds, y obtenemos:  $NR= 3516,34$ .

El número de Reynolds es mayor a 2000 y menor a 4000, considerándolo en la zona de transición, por lo cual, para nuestro estudio, lo analizaremos como un flujo turbulento.

Posteriormente de conocer el número de Reynolds, procedemos a calcular las pérdidas mayores y menores. Para nuestro estudio solo tenemos en cuenta las pérdidas mayores, que son las producidas por la fricción que se da entre las paredes internas de la tubería y el fluido en movimiento. Para esto tenemos presente la (ecuación, conocida como la ecuación de Darcy

El factor de fricción se calcula, teniendo en cuenta la (ecuación 17), desarrollada por Jain [9] para el cálculo directo del valor del factor de fricción. (ecuación 17):

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7 \left( \frac{D}{\epsilon} \right) + \frac{5,74}{NR^{0,9}}} \right) \right]^2}$$

Para esto se calcula la rugosidad relativa, siendo esta la relación entre el diámetro de la tubería y la rugosidad promedio de la pared de la tubería, utilizando la (ecuación 18)

$$\frac{D}{\varepsilon} = \frac{\text{Diametro Tubería}}{\text{Rugosidad}}$$

El valor de diseño de la rugosidad del tubo es:  $\varepsilon = 3.0 \times 10^{-7}$  m. [9]

Una vez determinado la rugosidad de la pared de la tubería, se procede a determinar el factor de fricción con la, y obtenemos:  $f = 0,04227$

Luego de obtener el valor del factor de fricción, determinamos el valor de las perdidas mayores producidas por la fricción, y obtenemos:  $h_L = 0,01478$  m

planteamos la ecuación general de la energía, que involucra las perdidas mayores y menores. Igual que sucedió en el cálculo del solo tenemos en cuenta las perdidas mayores producidas por la fricción entre el fluido de trabajo y las paredes internas de las tuberías, y

obtenemos la (ecuación 5).  $\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g}$  Tenemos en cuenta las mismas consideraciones pasadas en la (ecuación 6 ).

Por lo tanto de la (ecuación 7) , la caída de presión es:  $\Delta p = 0,14471$  Kpa

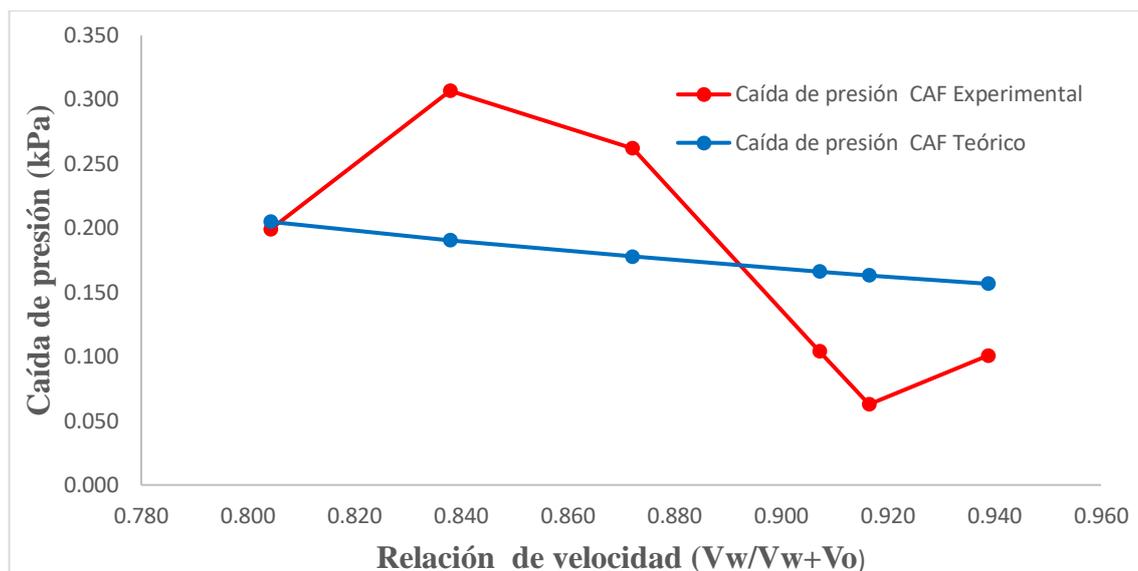
La velocidad del agua fue constante durante los ensayos experimentales, se manejó una velocidad de 0,25032 m/s.

#### 4.4.3. CAÍDA DE PRESIÓN CAF TEÓRICO Y CAF EXPERIMENTAL

En la (Gráfica 10) se puede observar la comparación entre la caída de presión para un CAF experimental y el CAF teórico. Se observa que los resultados de la caída de presión obtenidos experimentalmente varían un poco a los obtenidos teóricamente, esto debido principalmente a:

- Para los resultados teóricos se suponen un CAF a lo largo de la tubería de 2 m, mientras que en lo experimental la máxima distancia obtenida del CAF fue de 1 metro aproximadamente.
- Para los resultados teóricos se tiene en cuenta un perfecto CAF, en donde el núcleo se mantiene estable a lo largo de la tubería de pruebas, manteniendo así su diámetro de diseño, mientras que en lo experimental no ocurrió de la misma forma. No se mantiene un núcleo estable, a su vez se produce un núcleo ondulado, que en algunas ocasiones la longitud de la onda alcanza a tocar las paredes internas de la tubería, que luego esto produce una estratificación de los fluidos y un poco de suciedad en la tubería.
- Las ecuaciones empleadas solo son válidas para el cálculo de la caída de presión teórica del régimen CAF, por lo que en lo teórico se supone un perfecto CAF a lo largo de la tubería. En lo experimental no sucedió así, en la tubería se vieron tres patrones de flujo característico, los cuales fueron: Flujo Anular al inicio de la tubería, Flujo estratificado y un Flujo emulsionado, gotas de aceite en una fase continua que era el agua.

Nótese que a una velocidad del aceite de 0,0609 m/s (velocidad a la que el CAF más se desarrolló aproximadamente 1 metro de distancia) y una velocidad constante del agua, la diferencia entre lo teórico y lo experimental fue de 0,006 kPa, siendo esta la menor diferencia presentada en la comparación de los 6 datos de muestra, lo que nos indica que si se logra un CAF constante a lo largo de toda la tubería, se puede llegar a una caída de presión igual o más cercana a la teórica. Los mejores resultados del régimen CAF se lograron en un rango de velocidades del aceite de 0,0550 m/s a 0,0609 m/s.



**Gráfica 10. Caída de presión Experimental CAF ( $V_w = \text{Cste} = 0,25032 \text{ m/s}$ ) vs Teórico CAF**

#### **4.4.4. RESULTADOS (DISTANCIA CAF DIFERENTES BOQUILLAS).**

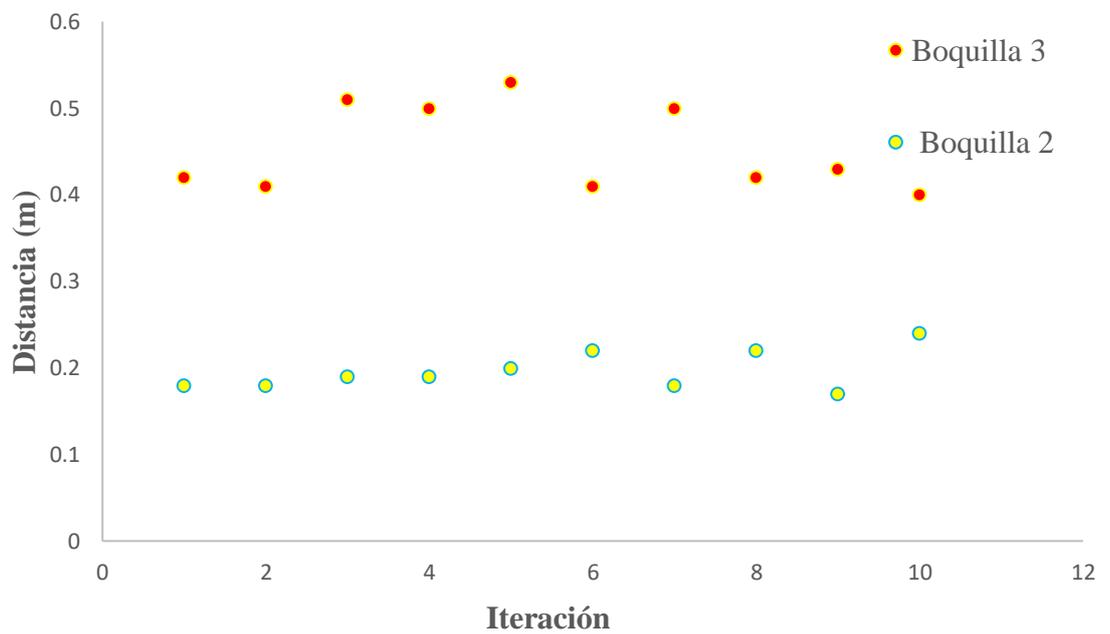
Se realizaron tres pruebas experimentales con las dos boquillas diseñadas, esto con el fin de poder realizar una comparación entre las dos. Las dos boquillas se instalaron en la bancada y se procedió a realizar las pruebas: En cada una de las pruebas primero se inició con flujo de agua por la tubería, y posteriormente se fue dando ingreso aceite progresivamente a la tubería. En esta parte del experimento se tomaron datos de distancia (metros) del desarrollo del CAF, a lo largo de la tubería de pruebas. Se seleccionaron tres velocidades del aceite para la prueba experimental y se mantuvo constante la velocidad del agua.

En el eje de la x, se muestra el registro de datos tomados con las condiciones de flujo. Para las tres condiciones de flujo presentadas a continuación se tomaron 10 datos de distancia, lo que significó realizar 10 veces el experimento con las mismas condiciones de flujo. Por otro lado, en el eje de la y, se relaciona la distancia en metros de las distintas iteraciones realizadas. Estas gráficas relacionan la distancia lograda del patrón de flujo CAF en la tubería de pruebas de la bancada experimental con las dos boquillas analizadas

y que fueron explicadas en los capítulos anteriores. Adicionalmente se presenta una tabla estadística con tres datos importantes: Distancia máxima del CAF, Distancia mínima del CAF y Distancia promedio del CAF, para cada una de las tres condiciones de flujo presentadas.

1. Primeras Condiciones del flujo:

$$V_o=0,02561 \text{ m/s} \quad V_w=0,25033 \text{ m/s}$$



**Gráfica 11. Distancia CAF a primeras condiciones de flujo**

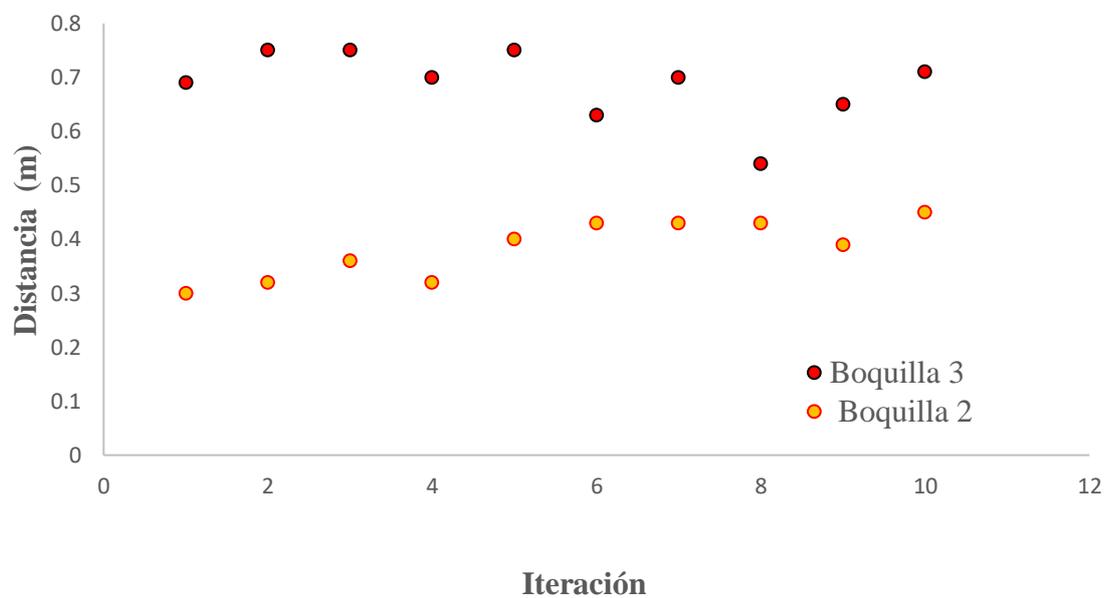
Datos estadísticos de la prueba:

<b>Distancia</b>	<b>Boquilla 3</b>	<b>Boquilla 2</b>
Máxima (m)	0,53	0,24
Mínima (m)	0,4	0,17
Promedio (m)	0,453	0,197

**Tabla 3. Datos estadísticos primeras condiciones de flujo**

2. Segundas Condiciones del flujo:

$$V_o=0,04113 \text{ m/s} \quad V_w=0,25033 \text{ m/s}$$



**Gráfica 12. Distancia CAF a segundas condiciones de flujo**

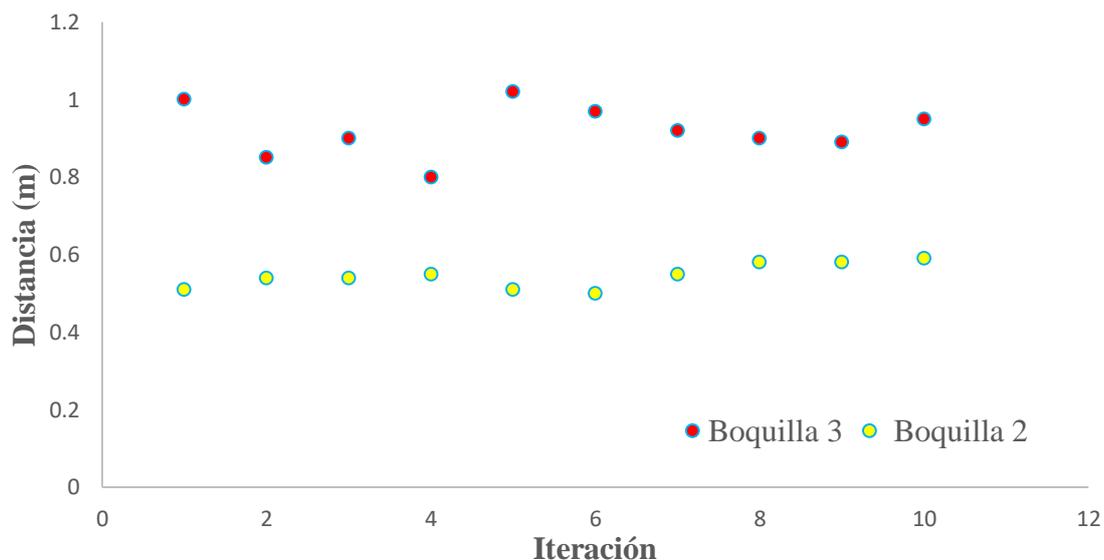
Datos estadísticos de la prueba:

<b>Distancia</b>	<b>Boquilla 3</b>	<b>Boquilla 2</b>
Máxima (m)	0	0
	,75	,45
Mínima (m)	0	0
	,54	,3
Promedio (m)	0	0
	,687	,383

**Tabla 4. Datos estadísticos segunda condiciones de flujo**

3. Tercera Condiciones del flujo:

$$V_o=0,06093 \text{ m/s} \quad V_w=0,25033 \text{ m/s}$$



**Gráfica 13. Distancia CAF a tercera condición de flujo**

Datos estadísticos de la prueba:

Distancia	Boquilla 2	Boquilla 3
Máxima (m)	0	1
Mínima (m)	0	0
Promedio (m)	0	0

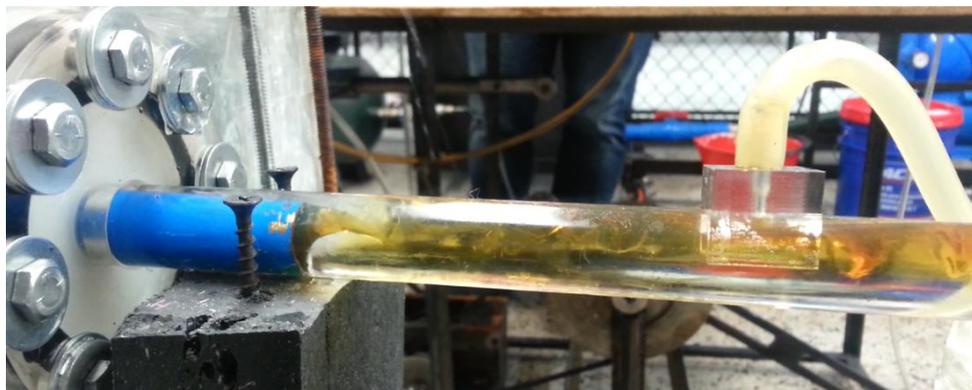
**Tabla 5. Datos estadísticos tercera condición de flujo**

Como se puede observar en las tres gráficas Gráfica 11-Gráfica 12-Gráfica 13), se logran mayores distancias del patrón de flujo CAF con la (boquilla 3), a medida que se aumenta la velocidad del aceite se obtiene una mayor distancia del CAF. A una velocidad del aceite de 0,06093 m/s y una velocidad constante del agua de 0,25033 m/s se logró distancias con este patrón de flujo de 1,02 m que fue la mayor y una mínima distancia de 0.80, siendo el promedio de distancia para esta prueba de 0,92 m. Por otro lado, con estas

mismas condiciones de trabajo del patrón de flujo, para la (boquilla 2), se consiguieron menores distancias de desarrollo del CAF, siendo la máxima distancia alcanzada de 0,59 m, y la mínima de 0,5 m, siendo el promedio de distancia para esta prueba utilizando la boquilla 2 de 0,545 m de distancia.

En las tres pruebas se puede observar que aumentando la velocidad del aceite y con una velocidad constante del agua, el patrón de flujo CAF se desarrolla por más distancia, y a su vez se evidencia que en las tres pruebas la (boquilla 3) obtiene mejores resultados, debido al diseño, cuenta con una precámara que ayuda a estabilizar y distribuir uniformemente la presión en el anular, y permitía un constante flujo de agua. También influyó la existencia de una reducción gradual que permite aumentar la velocidad del fluido menos viscoso, y evitar la creación de perturbaciones por el cambio de secciones. La modificación de la bancada experimental también jugó un papel importante en la mejora de los resultados, ya que mejoró las dificultades que se explicaron anteriormente.

En los primeros ensayos del proyecto se utilizó la (boquilla 1) descrita anteriormente en la sección 2.1.(Figura 15) Con esta boquilla las distancias que se lograba del CAF eran mínimas, como se puede observar en la Figura 26.



a)  $P_w = 1 \text{ Psi}$      $P_o = 2 \text{ Psi}$



$$b). P_w = 1 \text{ Psi} \quad P_o = 3 \text{ Psi}$$



$$c). P_w = 2 \text{ Psi} \quad P_o = 4 \text{ Psi}$$

**Figura 26. Patrón de flujo boquilla #1**

A medida que se aumentaba la presión del aceite se lograba un poco más de flujo, pero era insuficiente, las distancias máximas alcanzadas aproximadamente eran de 0,1 m, muy poco en comparación con las distancias alcanzadas con la boquilla 2 y 3. En cada uno de los tres experimentos realizados podemos observar las distancias máximas y mínimas que se obtuvieron utilizando las dos boquillas.

#### 4.4.5. COMPARACIÓN DE NUESTROS RESULTADOS CON OTROS AUTORES

##### 4.4.5.1. Comparación con el modelo de p. poesio et. al

Poesio et. al[35], muestra sus resultados experimentales de la caída de presión con el método CAF con una tubería de 21 mm de diámetro y 9 metros de longitud. Los autores relacionan en una gráfica la medición caída de presión en kPa/m respecto a la velocidad del agua. Nótese en la (Figura 24) que a medida que aumenta la velocidad del aceite y del agua, aumenta la caída de presión para el flujo anular. Por ejemplo, para una velocidad del agua de aproximadamente 1,8 m/s y una velocidad de 0,55 m/s la caída de presión está entre un rango de 2,5 a 3 kPa/m, y a una velocidad menor de los dos fluidos ( $V_w=0,4$  m/s y  $V_o= 0,15$  m/s) la caída de presión está muy cercana a los 0,5 kPa/m. El comportamiento de estos datos experimentales de los autores es muy parecido a nuestros resultados teóricos asumiendo un CAF perfecto a lo largo de la tubería de pruebas.

En la presente investigación a medida que se aumenta la velocidad del aceite (m/s) y se mantiene constante la velocidad del agua, la caída de presión aumenta, debido a la relación que hay entre la velocidad y el número de Reynolds. Busquemos una velocidad del aceite y de agua parecida a la nuestras, encontramos una velocidad del agua de 0,4 m/s y una velocidad del aceite de 0,15 m/s, y con estas condiciones de flujo los autores determinaron una caída de presión de aproximadamente de 0, 25 a 0,5 kPa por metro. Ahora en la (Gráfica 4) observe que a una velocidad del aceite de 0,0609 m/s y una velocidad del agua de 0,25032 m/s, obtenemos una caída de presión de 0,219 kPa, que trabajando las mismas unidades de los autores obtenemos una caída de presión de 0,12489 kPaa por metro, obteniendo valores muy cercanos a los obtenidos por los autores.

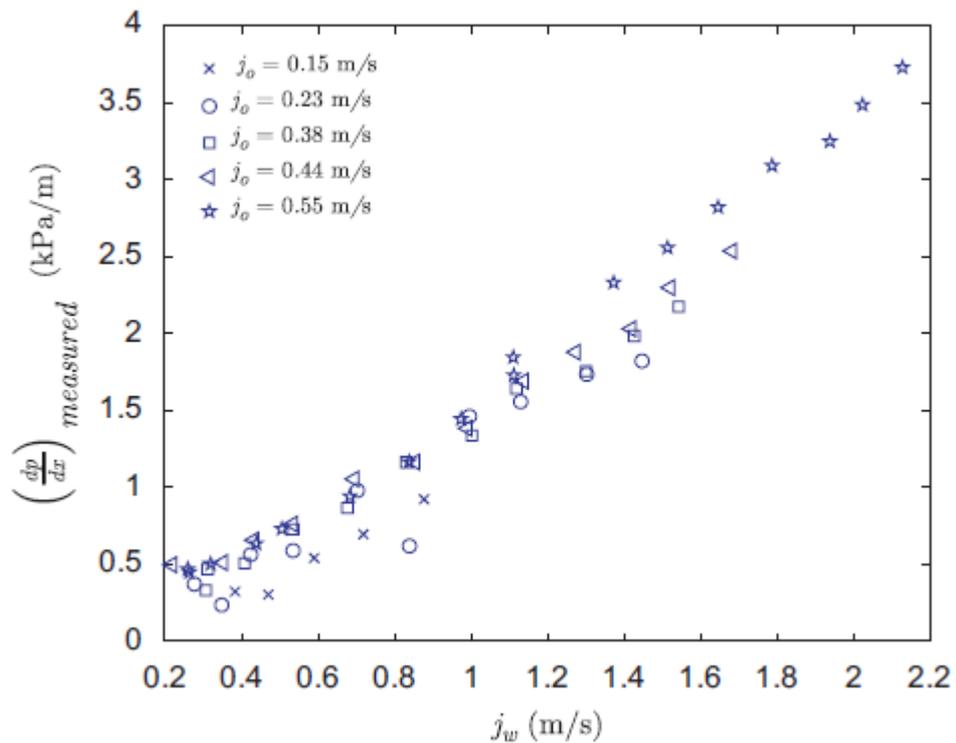
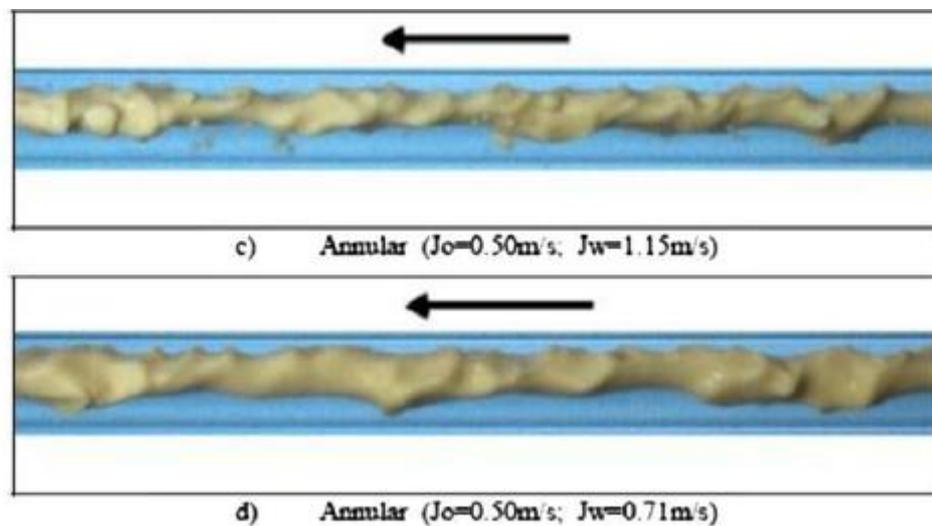


Figura 27. Resultados de. P. Poesio Et. Al[27]

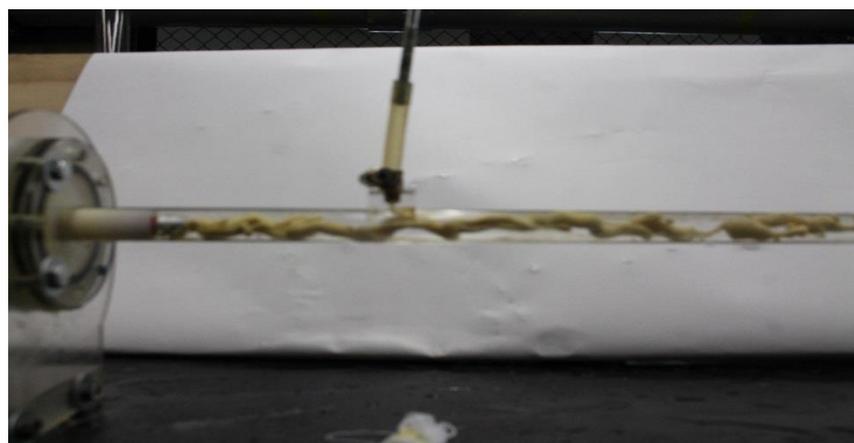
#### 4.4.5.2. Comparación con el modelo de G. Sotgia. et. al.

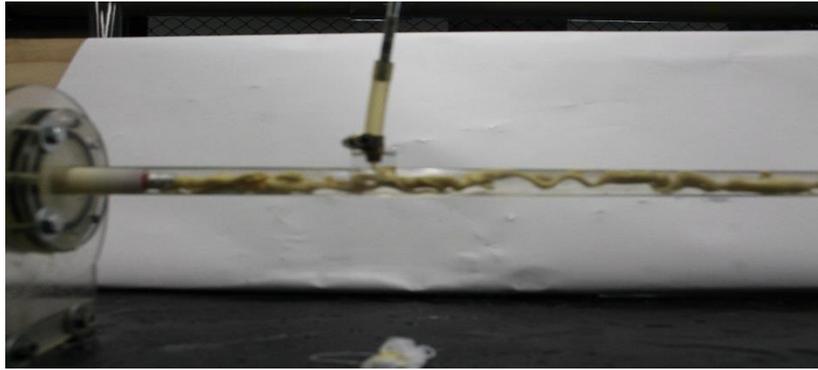
G. Sotgia. et. al.[14] mostraron imágenes de sus principales pruebas experimentales que fueron imágenes representativas de sus experimentos, utilizando una tubería Plexiglas de 26 mm de diámetro. Ellos en una de sus pruebas mantienen constante la velocidad del aceite de 0,50 m/s y disminuye la velocidad del agua desde 2,51 m/s hasta 0,11 m/s. Ellos notaron una transición de flujo a medida que disminuían la velocidad del agua. A una velocidad del agua de 2,51 m/s y una velocidad constante del aceite notaron un flujo disperso de aceite en agua, al disminuir la velocidad del agua se acercaban cada vez más a un flujo anular, consiguiéndolo con una velocidad del aceite de 0,50 m/s y una velocidad del agua 1,15 m/s y otra de 0,71 m/s. Si comparamos estos resultados experimentales con los nuestros, encontramos que la velocidad del agua en esta prueba fue siempre mayor que la del aceite, para nuestro caso la velocidad del agua fue de 0,25033 m/s y la velocidad del aceite fue de 0,0609 m/s. En nuestras pruebas experimentales la

velocidad del agua siempre fue constante y la que se varió fue la velocidad del aceite, Contrario a lo hecho en esta prueba por los autores. La velocidad del aceite conseguida por los autores fue 8.21 veces mayor que la nuestra. En su prueba la velocidad del agua fue 2,3 vece mayor que la del aceite, y en nuestro caso la velocidad del agua fue 4,11 veces mayor. Esto afecta el CAF debido a que hay más cantidad de agua en la tubería, y al ser dos líquidos inmiscibles, el aceite empieza a transportarse por medio de gotas por la parte superior de la tubería empujada por el agua.



**Figura 28.** Resultados obtenidos por Sotgia 2008 [12].





$$(V_o=0,0609 \text{ m/s} \quad V_w=0,25033 \text{ m/s} \quad )$$

**Figura 29. Resultados CAF de nuestras pruebas experimentales**

Nótese la diferencia de los núcleos, el nuestro es un núcleo más inestable que se ve influenciado por unas ondas en la interface de pequeña longitud, y a medida que avanza el aceite va perdiendo volumen y tiende a posicionarse en la parte superior de la tubería hasta que se logra una estratificación. En cambio, el flujo obtenido por los autores se ve un núcleo mucho más estable y continuo, y con gran volumen, siendo éste superior al volumen ocupado por el agua, se logra ver que el régimen se mantiene y que hay muy pocas ondulaciones en la interface, en comparación con las nuestras, que provocan que el núcleo empiece a romperse.

## 5. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se da a conocer la importancia del régimen de flujo Anular (CAF) en la industria petrolera y otras que manipule fluidos viscosos, además las consideraciones teóricas a tener en cuenta para el desarrollo del CAF. El estudio y diseño de una boquilla que permita lograr la configuración geométrica del patrón de flujo, descripción de un banco de pruebas para el desarrollo del CAF, y los parámetros de funcionamiento.

Dominicaa et. al [27], Bannwart et. al[22], y otros autores han observado y afirmado que existe una reducción en la caída de presión notable cuando se transporta aceite lubricado por agua trayendo consigo grandes beneficios a los interesados en el tema. A raíz de este motivo el objetivo de nuestra investigación se enfocó en la reducción de la caída de presión en una tubería horizontal mediante el método de transporte por flujo anular, y para lograr este fin se hizo indispensable, diseñar y fabricar una boquilla, que permitiera el paso del aceite y la entrada de agua al sistema. Tras la obtención de los resultados de las pruebas experimentales, el régimen de flujo núcleo anular, es una excelente opción para emplearse como método para transporte de crudo pesado, ya que reduce la caída de presión. Esto es debido a que el agua es la que entra en contacto, con las paredes de la tubería, reduciendo así pérdidas por fricción. En nuestros resultados experimentales pudimos demostrar que las caídas de presiones obtenidas por el método CAF son mucho menores, puesto que tuvimos una reducción de 95,73% en la caída de presión en comparación con las obtenidas transportando solo aceite.

La bancada experimental sufrió varias modificaciones a lo largo de nuestra investigación, esto ayudo a obtener mejores resultados en el desarrollo del patrón de flujo. Se cambió la manera de presurizar los fluidos de trabajo, antes se hacía con compresor, para posteriormente utilizar bombas que impulsaran los dos fluidos. Se instalaron

caudalímetros, y se modificó el acople de la boquilla a la bancada experimental, esto permitió tener menos desperdicios de agua y aceite, y evitar fugas de presión en el sistema. La bancada en general sirvió para nuestra investigación, y fue una parte importante en lo experimental.

Las velocidades juegan un papel importante para el desarrollo del patrón de flujo CAF. Se pudo evidenciar en los resultados de nuestra investigación que a una menor relación de velocidades de 0,804 la caída de presión es de 0,199 kPa para una velocidad máxima del aceite de 0.06092 m/s, con esta velocidad del aceite y una velocidad constante del agua, se logró los mejores resultados de patrón de flujo CAF. A menores velocidades del aceite se evidencio que el régimen de flujo CAF se desarrolló muy poco, y se identificaron otros tipos de flujo, entre los que encontramos un flujo estratificado, un flujo emulsionado, y un flujo disperso. Esto estuvo fuertemente relacionado con las velocidades del aceite, ya que se notó que, a una mayor velocidad del aceite, el núcleo se veía más estable y con mucho más volumen, lo que permitió que el flujo CAF se desarrollara mucho mejor.

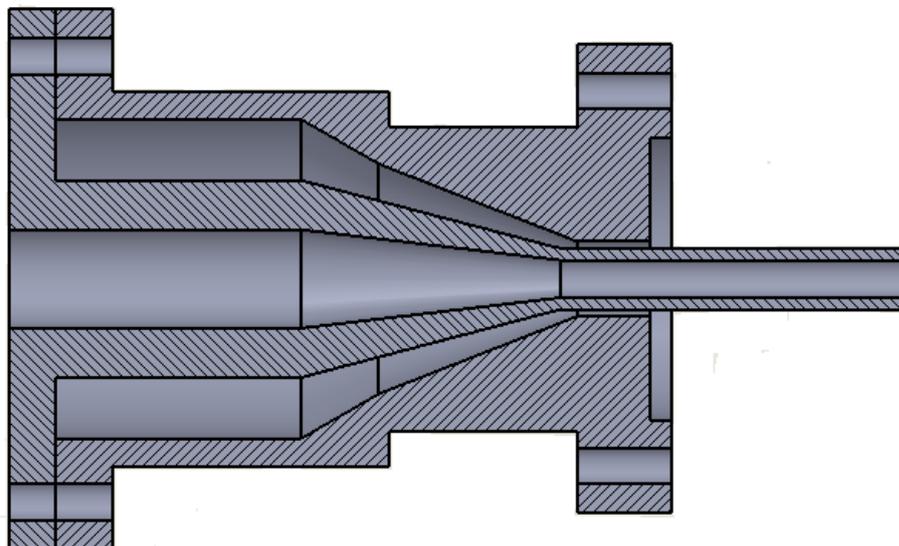
En los resultados experimentales se puede demostrar que las caídas de presiones obtenidas por el método CAF son comparables con el transportar solo agua como fluido de trabajo. En promedio la caída de presión con el patrón de flujo fue de 0,199 kPa mientras que la del agua fue de 0,157 kPa, siendo el CAF 21,10 % mayor que la del agua, estando muy cerca a la que se obtiene transportando solo agua, y teniendo en cuenta que el CAF no fue estable en toda la tubería, se presentaron otros patrones de flujos.

Se diseñaron tres boquillas a lo largo de la investigación, variando en su forma con el fin de poder obtener un mejor resultado CAF. Estas boquillas fueron puestas a pruebas

en el banco experimental, logrando mayores resultados a medida que se fueron modificando. A su vez el banco experimental sufrió grandes transformaciones.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer una modificación a la boquilla con el fin de determinar si aporta a un mayor desarrollo del flujo. En la boquilla macho modificar la entrada del aceite, es decir, aumentar el diámetro de la entrada del aceite y hacerle una reducción gradual del diámetro del núcleo, esto con el fin de obtener una mayor velocidad del aceite, en comparación a la boquilla que fue objeto de nuestra investigación.



**Figura 30. Propuesta para un nuevo diseño de boquilla**

- Con la finalidad de transportar mayor volumen de aceite que de agua, se recomienda instalar un variador de velocidad a la bomba de agua.



## 7. REFERENCIAS

- [1] “Los países más ricos en ‘oro negro’ • Forbes Mexico.” [Online]. Available: <https://www.forbes.com.mx/los-paises-mas-ricos-en-oro-negro/>. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [2] “Propiedades del petróleo crudo - Educación en Ingeniería Química.” [Online]. Available: <http://www.ssecoconsulting.com/propiedades-del-petroacuteteleo-crudo.html>. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [3] D. reservados I. enrgetica General, “INGENIERÍA ENERGÉTICA GENERAL,” 2013.
- [4] I. Israel and C. Herrera, “Productividad en yacimientos de crudo pesado,” 2016.
- [5] Juliana María Rodríguez Pinzón, “Estudio Del Sector Petrolero Para La Generación De Una Empresa De Bienes En El Sector.,” 2012.
- [6] J. J. Felix *et al.*, “La importancia del petróleo pesado,” *Oilf. Rev.*, vol. 18, pp. 38–59, 2013.
- [7] A. Joao, Beik ; Baker, “Petróleo Pesado,” *Sc lumberger*, pp. 2–4, 2016.
- [8] “Gráfico de la semana de Campetrol LA ERA DE LOS CRUDOS PESADOS EN COLOMBIA - Inteligencia Petrolera.” [Online]. Available: <http://inteligenciapetrolera.com.co/inicio/grafico-de-la-semana-de-campetrol-la-era-de-los-crudos-pesados-en-colombia/>. [Accessed: 24-Aug-2017].
- [9] R. Mott, “Mecánica de fluido aplicada.” p. 515, 1984.
- [10] I. E. No, “INFORME ECONÓMICO No . 2,” no. 2, 2017.
- [11] R. F. Oñate-Morales, José Anibal. Rodriguez-Navas, “Evaluación de las alternativas de transporte de crudo pesado por tuberías: caso aplicado al campo rubiales,” *Esc. Ing. Pet. Uis*, 2012.

- [12] A. Gabriel and H. García, “Estudio de flujo bifásico - aceite en tuberías verticales empenado dinámica de fluidos computacional,” 2015.
- [13] R. Martínez-Palou *et al.*, “Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 75, no. 3–4, pp. 274–282, 2011.
- [14] G. Sotgia, P. Tartarini, and E. Stalio, “xturesExperimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil-water mi,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 34, no. 12, pp. 1161–1174, 2008.
- [15] D. D. Joseph, R. Bai, K. P. Chen, and Y. Y. Renardy, “CORE-ANNULAR FLOWS,” vol. 29, no. January, pp. 1–30, 1997.
- [16] J. L. Trallero, C. Sarica, and J. P. Brill, “A Study of Oil/Water Flow Patterns in Horizontal Pipes,” *SPE Prod. Facil.*, vol. 12, no. 3, pp. 165–172, 1997.
- [17] Centro de Información Tecnológica (Chile), *Información tecnológica*. Centro de Información Tecnológica.
- [18] A. De, L. Sincronización, and F. Por, *Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Ciencias*. 2010.
- [19] D. Libreros, “Análisis dinámico del comportamiento del flujo anular mediante el procesamiento de señales,” 2008.
- [20] L. D. I. Q. Unam, “Flujo de Fluidos,” *Agosto 2002*, pp. 1–27, 2002.
- [21] O. M. H. Rodríguez, A. C. Bannwart, and C. H. M. de Carvalho, “Pressure loss in core-annular flow: Modeling, experimental investigation and full-scale experiments,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 67–75, 2009.
- [22] T. Al-Wahaibi *et al.*, “Experimental investigation on flow patterns and pressure gradient through two pipe diameters in horizontal oil-water flows,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 122, pp. 266–273, 2014.
- [23] D. Strazza and P. Poesio, “Experimental study on the restart of core-annular flow,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 90, no. 11, pp. 1711–1718, 2012.
- [24] D. D. Joseph, M. Renardy, and Y. Renardy, “Instability of the flow of immiscible

- liquids with different viscosities in a pipe,” vol. 141, 1983.
- [25] L. Preziosi, K. Chen, and D. D. Joseph, “Lubricated pipelining stability of core annular flow,” *J. Fluid Mech.*, vol. 201, pp. 323–356, 1989.
- [26] JULIETTE GAVIRIA NAVARRO, “MECANICA DE FLUIDOS : NUMERO DE REYNOLDS.” [Online]. Available: <http://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com.co/2015/11/numero-de-reynolds.html>. [Accessed: 07-Sep-2017].
- [27] S. Ghosh, G. Das, and P. K. Das, “Simulation of core annular downflow through CFD-A comprehensive study,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 49, no. 11, pp. 1222–1228, 2010.
- [28] S. Ghosh, T. K. Mandal, G. Das, and P. K. Das, “Review of oil water core annular flow,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1957–1965, 2009.
- [29] A. Bensakhria, Y. Peysson, and G. Antonini, “Experimental study of the pipeline lubrication for heavy oil transport,” *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 523–533, 2004.
- [30] “Bombas Multietapas Horizontales en acero inoxidable VHSE 2 6-13-1 HF,” p. 2015, 2015.
- [31] R. This, M. Completely, B. Attempting, and T. O. Connect, “MODEL TFP-LI MODEL TFM-LI MODEL TFP-LP MODEL TFM-LP Flow Sensors and Flow Meters For Liquids Installation Manual & Operating Instructions,” no. June, 2008.
- [32] L. Electronic, “SD Card real time data logger.”
- [33] D. Producto, “Gulf Gear MP SAE 80W90 Y 85W140 API GL-5 Gulf Gear MP SAE 80W90 Y 85W140 API GL-5.”
- [34] “Introducción a las Bombas de Desplazamiento Positivo (PD) Part 1 de 2 - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=yRJxB8mv6Ao>. [Accessed: 29-Aug-2017].
- [35] D. D. Joseph, A. C. Bannwart, and Y. J. Liu, “Very-viscous- oil/water/air flow through horizontal pipe: Pressure drop measurement and prediction,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 22, no. 6, pp. 1247–1254, 1996.

- [36] M. S. Arney, "FRICTION FACTOR AND HOLDUP STUDIES FOR LUBRICATED PIPELINING-I." .

## 8. ANEXOS

### **ANEXO 12.**

### **ACTA ENTREGA DE TRABAJO.**

### **DERECHOS DE AUTOR**